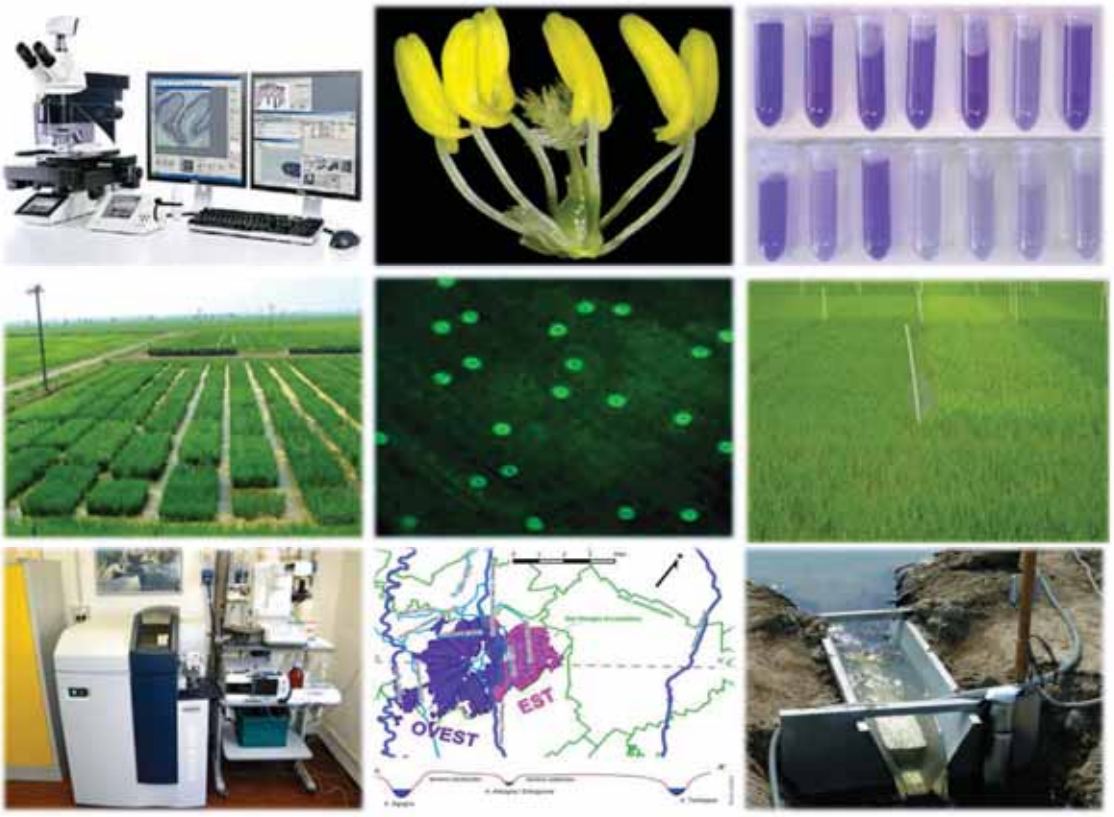
FONDO PER LA PROMOZIONE DI ACCORDI ISTITUZIONALI

"PIATTAFORMA DI BIOTECNOLOGIE VERDI E DI TECNICHE GESTIONALI PER UN SISTEMA AGRICOLO AD ELEVATA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE"

QUADERNO

GESTIONE DELLA RISORSA IRRIGUA



Febbraio 2014

RegioneLombardia

Studio condotto nell'ambito del progetto BIOGESTECA

Hanno partecipato alle attività di ricerca e alla stesura del testo:

Alessandro Abruzzese[a], Erminio Albertario[c], Gianluca Beltarre[b], Gian Battista Bischetti[a], Sara Borin[a], Marco Canella[c], Daniela Cavalluzzo[c], Sandra Cesari de Maria[a], Enrico Chiaradia[a], Lucia Colombo[a], Lucio Conti[a], Daniele Daffonchio[a], Marta Dell'Orto[a], Ludovico Dreni[a], Arianna Facchi[a], Daniele Ferrari[a], Massimo Galbiati[d], Claudio Gandolfi[a], Olfa Gharsallah[a], Nahuel González-Schain[a], Martin Kater[a], Giorgio Lucchini[a], Daniele Masseroni[a], Eleonora Miniotti[b], Federica Monaco[a], Fabio F. Nocito[a], Mauro Porrini[a], Matteo Riboni[a], Michele Rienzner, Marco Romani[b], Federico Righettini[a], Eleonora Rolli[a], Ramona Marasco[a], Fabio Rusconi[d], Gian Attilio Sacchi[a], Guido Sali[a], Marcello Scrosati[e], Claudia Sorlini[a], Chiara Tonelli[a], Giampiero Valè[c], Daniele Villa[e].

[a] *Università degli Studi di Milano*
[b] *Ente Nazionale Risi*
[c] *Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura*
[d] *Fondazione Filarete*
[e] *Agricola 2000*

Coordinamento:

Claudio Gandolfi, Arianna Facchi, Gian Battista Bischetti, Alessandro Abruzzese

FONDO PER LA PROMOZIONE DI ACCORDI ISTITUZIONALI

"PIATTAFORMA DI BIOTECNOLOGIE VERDI E DI TECNICHE GESTIONALI PER UN SISTEMA AGRICOLO AD ELEVATA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE"

QUADERNO

GESTIONE DELLA RISORSA IRRIGUA

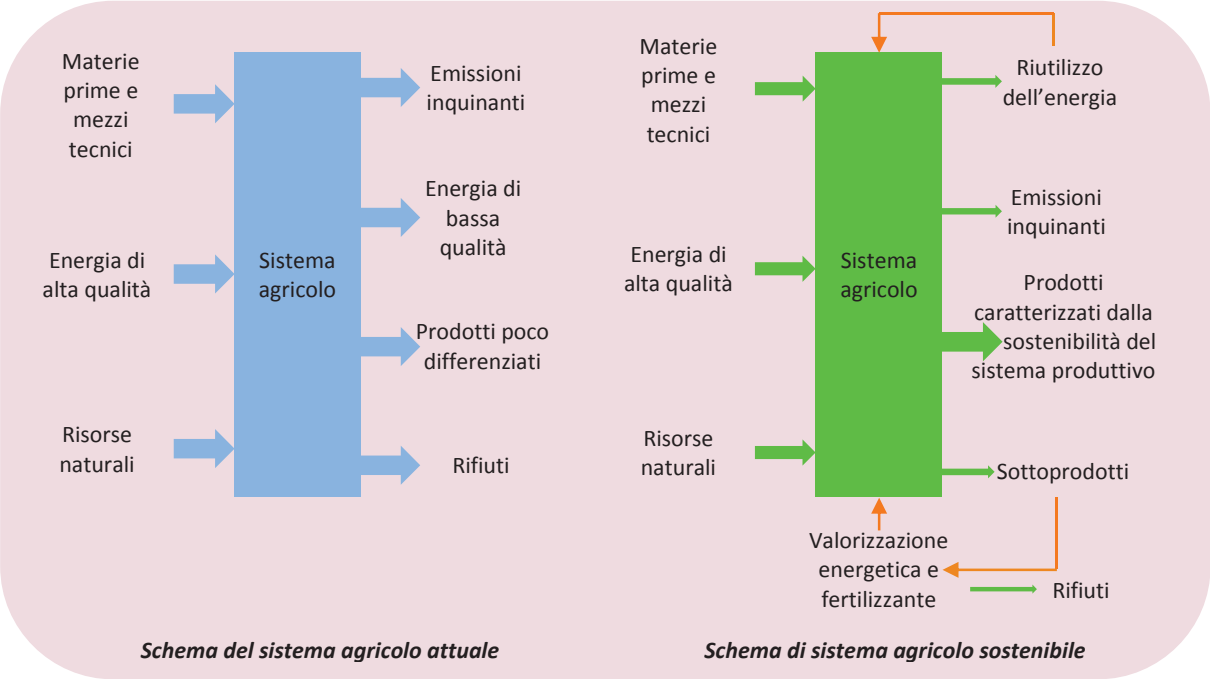
Presentazione

Per Regione Lombardia il sostegno all'innovazione e alla ricerca, la valorizzazione del capitale umano rappresentano leve fondamentali per rendere più attrattivo il territorio, aumentare la competitività del sistema economico, accademico, scientifico e sociale e rilanciare una crescita dinamica, solida e sostenibile. Ecco perché Regione Lombardia sta mettendo a fattor comune politiche qualificanti, svolgendo un ruolo di promotore e facilitatore di reti tra università e centri di eccellenza, istituzioni locali e nazionali, camere di commercio e associazioni di impresa a livello locale e globale. In questo contesto si inserisce il programma di Ricerca e Sviluppo "BIOGESTECA", uno degli 11 progetti finanziati da Regione Lombardia attraverso il "bando di invito a presentare proposte di accordi istituzionali per la realizzazione di programmi di ricerca e sviluppo nei settori energia, ambiente, salute e manifatturiero avanzato a valere sul fondo per la promozione di accordi istituzionali". Un bando che è stato lanciato nel 2009, con assegnazione nel 2010, di circa 27 milioni di euro, nell'ambito del Fondo per la Promozione di Accordi Istituzionali. Il programma BIOGESTECA, favorendo la costituzione di una rete collaborativa tra università, centri di ricerca, istituzioni e imprese del sistema lombardo della ricerca ne ha rafforzato la visibilità e la competitività a livello internazionale. Ma ha anche permesso di fornire risposte alla crescente domanda globale di prodotti alimentari, una delle principali sfide che ci attendono e tema di Expo Milano 2015, che deve necessariamente coniugarsi con uno sviluppo sostenibile, capace di tutelare l'ambiente e allo stesso tempo valorizzare l'applicazione di strumenti innovativi e tecnologici. BIOGESTECA ha il merito di offrire un contributo essenziale alla soddisfazione di tali esigenze attraverso un approccio innovativo cha ha portato anche alla realizzazione di una piattaforma di biotecnologie verdi e di tecniche gestionali per lo studio e la sperimentazione di diverse soluzioni che interagiscono tra di loro con la finalità condivisa della sostenibilità del sistema agricolo. I risultati prodotti dalle attività pluriannuali del progetto, che ha impegnato più di cento ricercatori e ha reclutato e formato più di quaranta dottorandi di ricerca e giovani ricercatori, ci forniscono interessanti spunti che a breve e medio termine si riveleranno utili per chi opera in Lombardia nei settori dell'agro-alimentare, delle bioenergie e della salvaguardia ambientale. Di certo il nostro impegno sarà rivolto, anche con la collaborazione della Camera di Commercio Industria Artigianato e Agricoltura di Lodi che ha cofinanziato il progetto, insieme a Regione Lombardia, a dare ampia divulgazione e promozione del trasferimento tecnologico dei risultati, con iniziative specifiche che si inseriranno tra quelle previste dalla Regione stessa e dai diversi Enti partner del progetto nelle attività di avvicinamento all'importante Esposizione Universale di Milano 2015.

Mario Melazzini
Assessore alle Attività produttive,
Ricerca e Innovazione di Regione Lombardia

Il programma di ricerca & sviluppo BIOGESTECA

La sostenibilità e competitività del sistema agricolo nel suo insieme impegnano il mondo della ricerca alla definizione continua di soluzioni e tecnologiche innovative. La configurazione attuale della produzione agraria si caratterizza per elevati impieghi di mezzi tecnici, risorse naturali ed energia che si traducono in impatti significativi sull'ambiente ed in consistenti produzioni di rifiuti. Allo stesso tempo, i prodotti agricoli hanno quasi sempre perso le loro connotazioni territoriali e la collettività stenta a riconoscere il ruolo dell'agricoltura come presidio di un territorio da mantenere e di cui usufruire. La competitività del sistema agricolo non può prescindere da questo riconoscimento, soprattutto in un contesto europeo dove viene sempre più riconosciuta una remunerazione, diretta o indiretta, alla multifunzionalità dell'agricoltura. L'obiettivo a cui tendere è, quindi, quello di un sistema agricolo che sia in grado di ridurre la pressione ambientale salvaguardando le risorse naturali limitando la produzione di rifiuti e recuperando i sottoprodotti in modo da trasformarli in energia e fertilizzanti. In questo modo, il sistema agricolo può caratterizzarsi come rispettoso dell'ambiente e generare al contempo esternalità positive riconoscibili e quindi remunerabili dalla collettività.

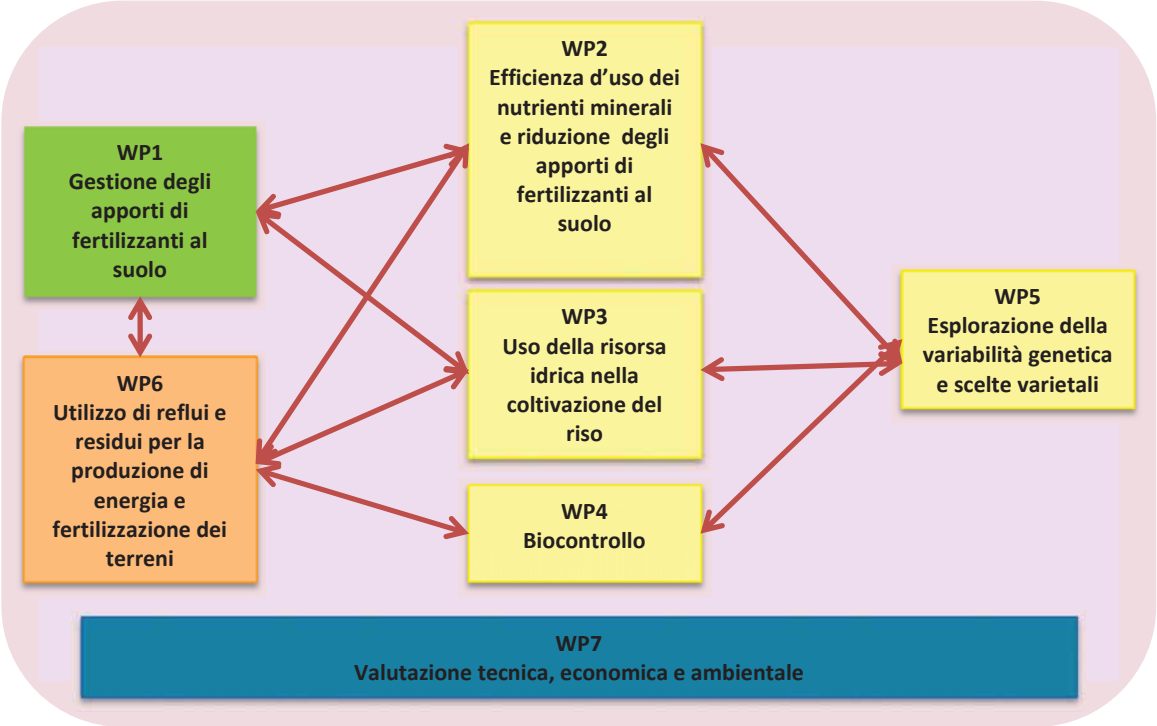


Schema del sistema agricolo attuale ***Schema di sistema agricolo sostenibile***

In stretta coerenza con le finalità del Bando "Accordi Istituzionali" lanciato nel 2009 da Regione Lombardia, il programma di Ricerca & Sviluppo BIOGESTECA ha generato e consolidato una rete collaborativa tra gruppi di ricerca appartenenti all'Università degli Studi di Milano, all'Università degli Studi di Milano Bicocca, al Consiglio per le Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, all'Ente Nazionali Risi, alla Fondazione Parco Tecnologico Padano, alla Fondazione Filarete e ad Agricola 2000, che creando forte sinergia e integrazione tra competenze ha prodotto nuove conoscenze e innovazioni tecnologiche in grado di fornire risposte alla richiesta di sostenibilità del sistema agricolo lombardo e più in generale delle agricoltura in ambienti ad elevata pressione antropica.

Le attività del Programma BIOGESTECA, articolate in sette workpakages, hanno adottato approcci di biotecnologie verdi per la definizione di strategie di gestione delle colture e del territorio agricolo a ridotto impatto ambientale in combinazione con tecnologie per la riduzione degli input e per l'utilizzazione dei reflui e residui con finalità energetiche e fertilizzanti. In particolare sono presi in considerazione aspetti delle colture e della loro gestione, relativi all'uso dell'acqua, dei fertilizzanti, dei presidi fitosanitari e dell'energia, al fine ultimo di migliorare l'efficienza d'uso di queste risorse a garanzia della sostenibilità

ambientale ed economica della produzione primaria. Per alcune delle tecnologie e delle alternative innovative sperimentate è stata eseguita anche una analisi tecnica, economica e ambientale in modo di acquisire una valutazione non solo delle singole soluzioni, ma anche dell'intero sistema in cui possono essere impiegate; ciò tenendo conto, quindi, anche dei loro effetti sull'ambiente in termini di energia, emissioni, utilizzo di mezzi tecnici, produzione di rifiuti e delle esternalità (positive e negative) delle produzioni agricole verso la collettività, quali il miglioramento della fruibilità e la salvaguardia del territorio.



I risultati del progetto, disponibili al sito www.biogesteca.unimi.it e raccolti in quattro volumi di sintesi (*Gestione della risorsa irrigua*; *Efficienza d'uso dei nutrienti e razionalizzazione delle fertilizzazioni; Biocontrollo delle avversità biotiche; Gestione e valorizzazione dei reflui*) forniscono alcune soluzioni tecniche e spunti innovativi che a breve e medio termine potranno fornire soluzioni efficaci per il rafforzamento della sostenibilità dell'agricoltura intensiva moderna, sia in un contesto regionale sia in un contesto più ampio nazionale e internazionale. Per quest'ultima ragione le attività e i risultati del Programma BIOGESTECA trovano piena collocazione tra le tematiche e gli obiettivi che caratterizzano l'evento EXPO in programma nel 2015 nel nostro paese.

Il programma si è avvalso per il monitoraggio dei lavori di un Comitato Guida che in qualità di membri esterni alla rete collaborativa ha annoverato esperti del settore di fama internazionale quali il Prof. Paolo Balsari (Università degli Studi di Torino), il Prof. Fabio Fava (Università degli Studi di Bologna), il Prof. Enrico Martinoia (Università di Zurigo), il Prof. Zeno Varanini (Università degli Studi di Verona) e il Prof. Fabio Veronesi (Università degli Studi di Perugia). Le divulgazione dei risultati tra gli *steakeholders* a vario titolo ad essi interessati si è avvalsa del sostegno della Camera di Commercio, Industria, Artigianato e Agricoltura di Lodi.

I coordinatori del Programma
Prof. Gian Attilio Sacchi
Prof. Giorgio Provolo

INDICE

1 Introduzione 1

2 Obiettivi 10

3 Attività svolte 12

3.1 I siti sperimentali 12

3.1.1 Caratteristiche climatiche e pedologiche del sito 12

3.1.2 Il sito sperimentale CRA-RIS di Vercelli 16

3.1.3 Il distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina 18

3.2 Aspetti specifici delle diverse attività 20

3.2.1 Indagini agronomico-colturali 20

3.2.2 Indagini idrologiche e idrauliche a scala parcellare 29

3.2.3 Indagini idrologiche e idrauliche a scala distrettuale 38

3.2.4 Indagini fisiologiche, ionomiche e metabolomiche 42

3.2.5 Indagini molecolari 44

3.2.6 Indagini microbiologiche 46

3.2.7 Indagini economiche 48

4 Risultati ottenuti 55

4.1 Aspetti agronomico-colturali delle diverse gestioni irrigue 55

4.1.1 Produzione e fattori della produzione (sito ENR di Castello d'Agogna) 55

4.1.2 Qualità merceologica 60

4.1.3 Flora infestante 63

4.1.4 Piriculariosi e presenza di Lissorhoptrus oryzophilusK 64

4.1.5 Efficienza d'uso dell'azoto 65

4.1.6 Monitoraggio sul contenuto di azoto nelle acque superficiali e profonde 66

4.1.7 Produzione e fattori della produzione (sito CRA-RIS di Vercelli) 70

4.2 Gestione ed efficienza di uso dell'acqua in campo 74

4.2.1 Analisi ed elaborazione dei dati 74

4.2.2 Risultati del bilancio idrologico ed efficienza d'uso dell'acqua 77

4.2.3 Risultati della modellistica idrologica del sistema suolo-coltura 79

4.3 Gestione irrigua e circolazione idrica territoriale 87

4.3.1 Bilancio idrologico per gli anni 2010 e 2011 87

4.3.2 Scenario di conversione della gestione irrigua del riso da sommersione continua a irrigazione intermittente 92

4.4 Aspetti fisiologici, ionomici e metabolomici 95

4.4.1 Stato fisiologico della coltura, mappe e analisi ionomiche 95

4.4.2 Analisi metaboliche 98

4.4.3 Mappe metabolomiche 101

4.5 Aspetti molecolari 102

4.5.1 Sviluppo di sistemi innovativi per la selezione di varietà di riso ad elevata efficienza d'uso dell'acqua e tolleranti la riduzione nella disponibilità idrica: controllo dell'attività stomatica 102

4.5.2 Risposte geniche alle alte temperature: approccio di RNA-sequencing 105

4.6 Ruolo della componente microbica 106

4.7 Aspetti economici 109

4.7.1 Gestione delle superfici aziendali 109

4.7.2 Performances economiche 111

5 Conclusioni 115

5.1 Aspetti agronomici, produttivi e ambientali 115

5.2 Aspetti idraulico-agrari 117

5.3 Aspetti fisiologici, ionomici e metabolomici 118

5.4 Aspetti molecolari 119

5.5 Aspetti microbiologici 120

5.6 Aspetti economici 121

6 Bibliografia generale 122

1. Introduzione

Il riso è una delle principali colture destinate all'alimentazione umana e costituisce la base della dieta per più della metà della popolazione mondiale. A livello planetario il riso è attualmente coltivato su una superficie di circa 160 milioni di ettari, con una produzione vicina a 700 milioni di tonnellate (FAO, 2012), della quale circa il 90% si ha in Asia. La produzione europea è quantitativamente modesta (circa 3 milioni di tonnellate) e concentrata in poche aree tra cui l'Italia, che è il maggiore produttore europeo con oltre la metà della produzione complessiva su 235 mila ettari circa coltivati nel 2012 (il 52% della superficie europea a riso), ed elevati livelli qualitativi. Per far fronte alle esigenze del consumatore, l'Unione Europea importa notevoli quantitativi di prodotto da paesi terzi; tali importazioni potrebbero essere soddisfatte da uno sviluppo della risicoltura comunitaria, ed in particolare di quella italiana, con maggiori garanzie in termini di sicurezza qualitativa e salubrità.

La produzione italiana si concentra, in particolare, nella porzione di pianura Padana che si trova a est del fiume Ticino, a cavallo tra le regioni Lombardia e Piemonte, che è la più importante area risicola d'Europa con oltre 200 mila ettari (oltre il 90% delle risaie italiane).

La risicoltura nel territorio piemontese e lombardo ha origini antichissime ed ha sempre avuto uno strettissimo rapporto con la risorsa e l'ambiente idrico disponibile. La particolare giacitura nord-ovest / sud-est di questa porzione della pianura del bacino del fiume Po, che la delimita sul margine meridionale, ha facilitato la creazione di un infinito e non più replicabile reticolo irriguo che in oltre cinquecento anni ha dato vita anche ad uno dei più interessanti ambienti naturali oggi riscontrabili (Figura 1.1).

A causa dell'elevato fabbisogno irriguo e della notevole estensione della superfici ad esso dedicata, la coltivazione del riso comporta un notevole impatto sulle risorse idriche e si valuta che a livello mondiale circa il 40% delle acque utilizzate per l'irrigazione siano destinate ad aree risicole (Bouman et al., 2007b).

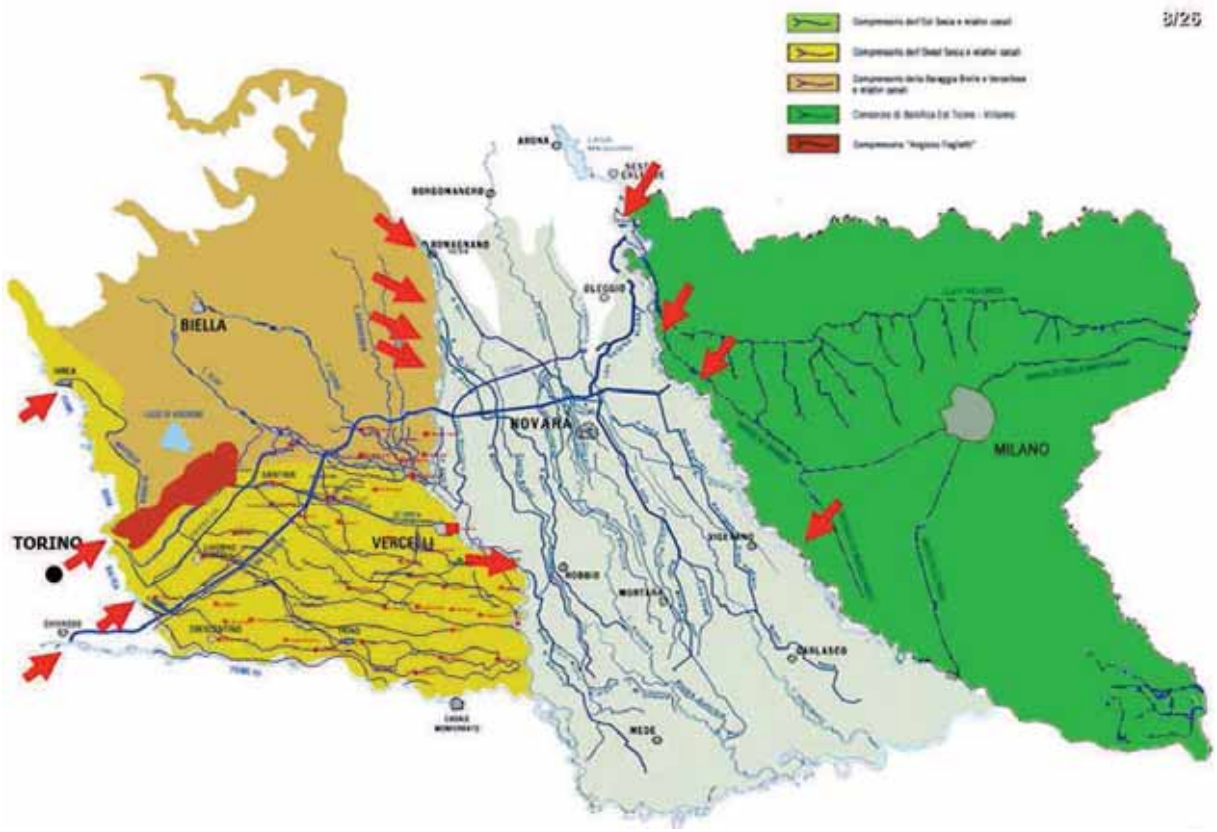


Figura 1.1. I comprensori irrigui tra Dora Baltea ed Adda (Fonte Associazione Irrigazione Est Sesia)

Gli elevati volumi d'acqua richiesti dalla coltivazione del riso non è dovuta a particolari necessità fisiologiche di questa specie, che non può in alcun modo essere considerata acquatica, ma a ragioni di carattere agronomico che si avvalgono della sua capacità di adattarsi morfologicamente e fisiologicamente alla sommersione dei suoli. Il ruolo principale che assolve lo strato idrico sulla coltura, nelle prime fasi dello sviluppo, è quello di volano termico, proteggendola dagli improvvisi sbalzi di temperatura. Tale protezione, determinante per il raggiungimento dei livelli produttivi, risulta essenziale a partire dalle prime fasi di germinazione fino alla fine della fase riproduttiva. Oltre a questo, la sommersione esplica una serie di effetti sia a livello delle caratteristiche chimiche del suolo sia per quanto riguarda gli aspetti agronomici, con riflessi evidenti sulla gestione della coltura. Tra questi si ricordano le modificazioni a carico di alcuni elementi nutritivi, l'innalzamento del pH, il contenimento di alcune erbe infestanti.
Il valore medio dell'efficienza d'uso fisiologica dell'acqua (WUE) delle varietà di riso attualmente coltivate, intesa come la quantità di granella prodotta per il volume complessivo di acqua evotraspirata, si attesta intorno ai 1,1 g per litro e non è assolutamente diverso da quello riportato per gli altri principali cereali C_3. Tale efficienza crolla drasticamente a valori di 0,4 g per litro di acqua se si considera la quantità di acqua complessivamente richiesta nel caso della sommersione continua (Tuong et al., 2005).
Le mutate condizioni sia di tipo ambientale (criteri di ecocompatibilità, riduzione della disponibilità della risorsa idrica e costante aumento delle richieste d'acqua per nuovi usi), sia di tipo economico (politiche agricole comunitarie), inducono anche nel comparto risicolo la necessità di una revisione delle modalità di coltivazione, in funzione delle diverse caratteristiche territoriali (disponibilità idrica, tipologie di suolo, infrastrutture irrigue).
In particolare, i mutamenti climatici stanno determinando un rapido arretramento dei ghiacciai alpini e, soprattutto, una diversa distribuzione delle disponibilità idriche nell'arco dei mesi primaverili ed estivi non sempre compatibile con le esigenze della risicoltura. Questa situazione estremamente negativa per il comparto risicolo comporta altresì una minaccia al mantenimento della biodiversità e delle aree umide che caratterizzano l'areale risicolo.
Anche i nuovi orientamenti normativi in ordine alla disciplina quantitativa delle derivazioni a scopo irriguo, e quelli riguardanti la qualità delle acque (oltre al riordino dei Consorzi di Irrigazione e Bonifica) possono indurre rilevanti conseguenze sul sistema della risaia. Alla luce delle indicazioni imposte dalla Direttiva Quadro sulle acque 60/2000 diventa importante studiare il sistema agricolo, i suoi limiti e le sue potenzialità, e valutare quali implicazioni possano avere le decisioni politiche sul sistema e come queste possano ulteriormente indirizzare le politiche dell'acqua
La risicoltura è un'attività tradizionalmente e fortemente legata all'acqua. Per questo motivo la conduzione dell'attività agricola in aree particolarmente vocate alla coltivazione del riso, si lega profondamente anche alla politica dell'acqua, in termini di costi della risorsa, gestione ed utilizzo razionale.
I costi produttivi della coltura risicola nel corso degli ultimi anni hanno subito incrementi importanti anche a causa dei significativi incrementi dei prezzi energetici che rendono necessaria l'individuazione di tecniche gestionali più razionali e sostenibili. Se noi confrontassimo la produttività della risicoltura italiana con quella di paesi con una struttura produttiva analoga, quali California e Australia, non si può che evidenziare la necessità di interventi agronomici che consentano di valorizzare le potenzialità produttive delle varietà disponibili e che costituiscono un patrimonio per il nostro Paese.
Nel mondo i sistemi di coltivazione del riso, i suoli utilizzati e l'evoluzione delle tecniche irrigue sono molto complessi in relazione al soddisfacimento delle specifiche condizioni ambientali e socio-economiche dei risicoltori. Sebbene l'adozione di un unico criterio di classificazione è estremamente difficoltoso (De Datta, 1981), sulla base del regime idrico instaurato è possibile identificare i seguenti sistemi di coltivazione (Figura 1.2.):

Upland, che non prevede la presenza di uno stato di sommersione per nessuna fase del ciclo colturale.
E' diffuso in Asia, Africa e America Latina, dove è generalmente praticato in condizioni di agricoltura di sussistenza, ad eccezione del Brasile che si differenzia per un buon livello di meccanizzazione nelle aziende risicole. Si stima che circa il 10% della risicoltura mondiale è condotta in assenza di una sommersione permanente.

Lowland, che prevede la sommersione con uno spessore d'acqua compreso tra i 5-50 cm.
Viene praticato in aree dove si trovano sistemi di coltivazione in cui l'unica fonte di approvvigionamento idrico deriva dall'acqua piovana (*Rainfed rice*) e dove è stata sviluppata una vera e propria rete irrigua. I primi sono perlopiù situati nelle aree tropicali di India, Pakistan, Bangladesh, Indonesia, Sri Lanka, Thailandia e Filippine e di norma viene adottata prevalentemente la tecnica del trapianto, anche se sono sempre più diffuse aree risicole in cui viene praticata la semina diretta. I secondi, invece, oltre che essere presenti nel Sud-Est asiatico dove pur coprendo solo il 32% della superficie coltivata forniscono la metà dell'intera produzione di quell'area, sono tipici dei paesi produttori di riso nei climi temperati come Cina, Giappone e Corea, e fuori dall'Asia: Australia, Stati Uniti ed Europa.

Deepwater (acqua profonda), che prevede uno strato di sommersione variabile tra 50 e100 cm.
Si tratta di un sistema utilizzato in prossimità delle foci (a delta) di importanti fiumi asiatici. Lo si trova anche in alcune località africane (Mali, Niger, Benin, Gambia e Sierra Leone) e in Equador. Una variante a tale sistema è denominata *Floating rice* (riso galleggiante), diffuso nei delta del Gange e del Brahmaputra in India e Bangladesh e del Mekong in Vietnam. In questo caso l'acqua di sommersione arriva alla profondità di 6 m.

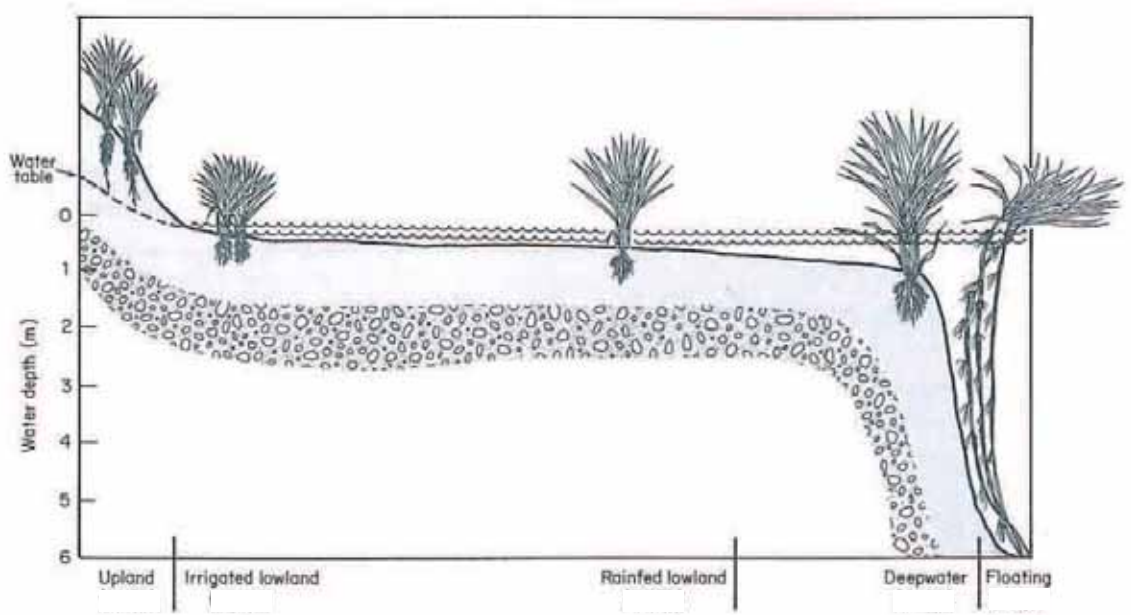


Figura 1.2. Classificazione mondiale dei sistemi di coltivazione del riso (fonte: De Datta, 1981)

Per quanto riguarda la gestione dell'acqua nelle camere di risaia sono riconosciute quattro tecniche principali:

Sommersione continua, con altezza della coltre d'acqua limitata (2,5 -7,5 cm) e nessun ricircolo.

La tecnica consente un ottimo potenziale produttivo, una limitata fluttuazione delle temperature tra il giorno e la notte e un'elevata efficienza della concimazione azotata.

Sommersione continua, con altezza della coltre d'acqua elevata (> 15 cm) e nessun ricircolo.
La tecnica consente di mantenere elevate prestazioni produttive a condizione che vengano impiegate varietà adattate; in genere, sono richieste maggiori dotazioni irrigue a causa delle notevoli perdite per infiltrazione.

Sommersione continua con ricircolo continuo.
E' molto utile in presenza di acqua irrigua caratterizzata da temperatura superiore ai 35 °C e poco ossigenata. Consente di aumentare la biodisponibilità di nutrienti e di mantenere la parte più superficiale del suolo in condizioni ossidanti. Ne deriva un'elevata produttività nelle aree caratterizzate da andamenti climatici piuttosto torridi durante le fasi riproduttive della coltura.

Irrigazione turnata
La disponibilità dell'acqua di irrigazione avviene ad intervalli periodici e gli appezzamenti possono rimanere o meno in condizioni di asciutta tra un adacquamento ed il successivo. Tale sistema è adottato in situazioni di scarsità della risorsa irrigua. La produttività è solitamente inferiore alle altre gestioni, ma dipende molto dalla frequenza dei turni irrigui e dai genotipi utilizzati.

Generalmente l'irrigazione viene somministrata mantenendo la coltura in sommersione pressoché continua, determinando un fabbisogno irriguo complessivo di gran lunga superiore a quello degli altri cereali. D'altra parte, proprio la peculiarità del metodo di irrigazione, insieme all'ampiezza e compattezza che spesso caratterizzano le aree a vocazione risicola, la coltivazione del riso ha determinato una fortissima influenza sul paesaggio e sull'ambiente, che risultano chiaramente connotati dall'imponente circolazione e presenza dell'acqua.
Gli elevati fabbisogni irrigui della coltivazione del riso sono causati principalmente dai cospicui flussi idrici in uscita dovuti al drenaggio superficiale ed alla percolazione verso la falda. In linea di massima, quest'ultima da sola è stimata essere pari almeno a un quarto degli apporti totali (per irrigazione e pioggia) in suoli poco permeabili con falda a piccolissima soggiacenza, cioè entro 50 cm dal piano campagna (Cabangon et al., 2004; Dong et al., 2004), e supera l'80% degli apporti nel caso di suoli con tessitura più grossolana e falda con soggiacenza più elevata, cioè maggiore di 1,5 m (Sharma et al., 2002; Choudhury et al., 2007). Proprio per questo, data la crescente competizione per l'uso dell'acqua anche nelle aree tradizionalmente ricche di questa risorsa, il tema del risparmio idrico in risicoltura sta riscuotendo un grande interesse e la maggior parte delle tecniche per il risparmio idrico a scala di campo, mira proprio alla riduzione delle perdite per percolazione (Bouman and Tuong, 2001; Tuong et al., 2005; Govindarajan et al., 2008).
L'introduzione di modalità di gestione dell'irrigazione della risaia in grado di ridurre i consumi d'acqua, è inoltre sempre più incentivata per liberare risorse idriche che permetterebbero di espandere le aree coltivate o per mitigare gli effetti del cambiamento climatico. La disponibilità di varietà a ciclo colturale breve e geneticamente più adatte, nonché la messa a punto di metodi efficaci di controllo delle infestanti, infatti, renderebbero questi metodi convenienti dal punto di vista economico per molte aziende.
Questa tendenza che è in atto a livello mondiale, negli ultimi anni ha interessato anche l'ambito europeo e in particolare quello della pianura Padana, dove si è iniziato a coltivare il riso con diverse modalità di gestione irrigua e in modalità aerobica. Sebbene siano state osservate molteplici varianti in relazione alle specifiche condizioni agro-ambientali e di disponibilità irrigua presenti sul territorio, in linea di massima possono essere identificati tre differenti sistemi di semina e gestione dell'acqua in risaia.

Semina in acqua e sommersione continua

La semina avviene a spaglio con riso precedentemente ammollato. La risaia viene, quindi, mantenuta sommersa per gran parte del ciclo colturale con particolare riferimento alle prime fasi, quando le differenze termiche tra il giorno e la notte sono considerevoli e la sensibilità della coltura è maggiore e a eccezione di brevi periodi necessari al radicamento dei germinelli o all'esecuzione di pratiche colturali. La sommersione ha anche effetti nutrizionali favorevoli, che esulano dagli adattamenti fisiologici del riso, con particolare riferimento all'assimilabilità del fosforo e del potassio che aumenta notevolmente. Sono inoltre maggiormente disponibili silicio, ferro e manganese e, talvolta, questi due ultimi elementi possono addirittura causare problemi di tossicità per l'elevata concentrazione. Il prevalente grado di anossia migliora l'efficienza della concimazione azotata per la riduzione dei processi di nitrificazione a carico dell'azoto ammoniacale.

Dal punto di vista malerbologico la semina in acqua svolge un'azione di contenimento della germinazione dei semi di riso crodo interrati in profondità e una sostanziale riduzione della pressione delle infestanti graminacee riproducibili mediante seme. Fanno eccezione i biotipi di giavone "bianchi", particolarmente adatti all'ambiente sommerso. Per contro, sono presenti le tipiche specie acquatiche appartenenti alle famiglie delle *Pontederiacee*, *Ciperacee*, *Alismatacee* e *Butomacee*.

Considerando gli aspetti ambientali, le condizioni riducenti della risaia in sommersione limitano fortemente il rischio di inquinamento da nitrati delle falde e delle acque superficiali, mentre sarebbero penalizzanti per i processi di formazione del metano e di altri gas ad "effetto serra". Tuttavia, tali processi devono essere quantificati anche in relazione ad altri elementi dell'agrotecnica, in particolare alla gestione dei residui colturali. Rispetto alle colture "in asciutta", risultano maggiori i rischi di contaminazione delle acque da erbicidi.

La semina interrata a file e sommersione ritardata

Il riso viene seminato con la medesima attrezzatura utilizzata per il frumento e solo dopo aver raggiunto lo stadio di 3°- 4° foglia viene instaurato il regime di sommersione che induce una fase di stress causata dalla necessità di un adattamento fisiologico, che di norma viene superata nell'arco di 7-10 giorni. L'adozione della semina interrata risolve alcune problematiche colturali, offrendo al contempo un risparmio di manodopera per le minori esigenze deputate al governo dell'acqua, che è molto impegnativo nella prima parte della stagione. Inoltre, poiché la maggior parte delle operazioni colturali è effettuata su terreno asciutto, è fortemente limitato l'impiego delle trattrici munite di ruote di ferro.

Vantaggio principale offerto dalla semina interrata è l'ottenimento di investimenti adeguati ed uniformi in condizioni di terreno sciolto, dove invece si hanno le maggiori difficoltà di radicamento quando si adotta la semina in acqua, o dove sono frequenti avversità come le fermentazioni, la proliferazione delle alghe ed i danni da parassiti acquatici. Il maggior sviluppo dell'apparato radicale ed una taglia leggermente più ridotta rispetto alla semina in acqua, rendono meno problematico il fenomeno dell'allettamento, molto frequente nelle varietà a taglia alta.

Per quanto riguarda la flora infestante, la tecnica favorisce la presenza di graminacee (giavoni e riso crodo, in particolare), mentre risultano maggiormente controllate le malerbe tipicamente acquatiche.

Dal punto di vista ambientale, la tecnica offre la possibilità di una minore contaminazione delle acque superficiali da erbicidi. Per contro, le perdite di azoto in forma nitrica verso le falde assumono maggiori entità, specialmente nei casi di laute concimazioni in pre-semina. Con il metodo della semina interrata le operazioni colturali relative alla preparazione del letto di semina e la semina risultano, fortemente condizionate dall'andamento pluviometrico ed in generale, il ciclo colturale viene allungato di qualche giorno, specialmente per le semine precoci. In linea di principio, con la sommersione ritardata si dovrebbe registrare un risparmio idrico, anche se le perdite per percolazione potrebbero essere superiori rispetto alla

tecnica in sommersione tradizionale e si potrebbe avere un elevato fabbisogno idrico in stagione già avanzata, quando la disponibilità è più ridotta e si aggiungono le esigenze irrigue del mais. Spesso, per la sommersione dei campi, sono necessarie portate elevate in modo da favorire la distribuzione dell'acqua, riducendo l'infiltrazione in profondità. Occorre ricordare che la sommersione in epoca tradizionale (metà di aprile) delle risaie, permette altresì l'innalzamento delle falde, che limita la capacità drenante dei terreni, ed alimenta una rete di acqua di colatura, di cui se ne avvantaggiano le zone più estreme dei consorzi di irrigazione. In definitiva, sempre in linea di principio, a fronte di un risparmio idrico a livello di singolo appezzamento, la gestione dell'acqua a livello comprensoriale viene resa più problematica.

La semina interrata a file ed irrigazione turnata

Si tratta di una variante alla semina interrata con sommersione in 3° foglia, adottata nelle zone confinanti ai centri abitati e in situazioni di carenza idrica. E' maggiormente diffusa in Lombardia ad Est del fiume Ticino, nel consorzio d'irrigazione e bonifica Est Ticino-Villoresi. Questa tecnica è associata a potenziali produttivi ridotti rispetto alle altre due tecniche in quanto la coltura è sottoposta a maggiori stress ambientali. L'esperienza finora maturata ha evidenziato una maggiore sensibilità agli sbalzi termici, con conseguente aumento delle percentuale di sterilità delle spighette ed un incremento della suscettibilità al Mal del Collo e al Brusone fogliare causati dal fungo *Magnaporthe grisea*.

La riduzione potenziale dei consumi idrici, prospettata da questa tecnica, ha suscitato negli ultimi anni un notevole interesse da parte degli organismi responsabili della pianificazione dell'attività agricola. La sperimentazione condotta dall'Ente Nazionale Risi intorno alla metà degli anni '80, ha permesso di quantificare i fabbisogni irrigui, indicando i consumi ed i turni irrigui (Moletti, 1989). Operando con irrigazioni per scorrimento, i turni irrigui in condizioni di terreno sciolto sono stati di 10-12 giorni, mentre si allungavano a 14-16 nei suoli compatti. I volumi irrigui necessari risultavano approssimativamente di 1500 m^3 ha^{-1} e 1000 m^3 ha^{-1}, nelle due condizioni pedologiche. Infine, il numero degli interventi variava da 3 a 6 a seconda delle precipitazioni e del tipo di terreno. Considerando, invece, il metodo per aspersione, su terreno sabbioso il turno ottimale è stato identificato in 8 giorni, adottando volumi di adacquamento di 300 m^3 ha^{-1}. Mediamente, sono stati necessari 8-10 interventi per stagione colturale. A fronte di un risparmio idrico a livello di campo, la mancanza di condizioni di anaerobiosi continua comporta differenze sostanziali nel valore del potenziale di ossido riduzione del suolo (De Datta, 1981) con forti ripercussioni in termini agro-ecologici (Bouman et al., 2007a) e di risposte morfo-fisiologiche della pianta che possono anche avere conseguenze produttive (Colmer and Pedersen, 2008; Sritharan and Vijayalakshmi, 2007; Vallino et al., 2009). In un sistema anaerobico, dove dominano i processi di denitrificazione, metanogenesi e produzione di acido solfidrico, ad uno aerobico, dove domina il processo di nitrificazione, è da attendersi un aumento dei livelli dei nitrati in falda o l'emissione in atmosfera di gas serra. L'ambiente fortemente riducente dei suoli di risaia provoca l'emissione di metano (Yan *et al.*, 2005), mentre l'alternanza di condizioni aerobiche ed anaerobiche risulterebbe favorevole al rilascio di protossido d'azoto (Yu and Patrik, 2004). Una corretta gestione agronomica dovrebbe essere considerata per ridurre tale effetto o che potrebbero essere contenuti attraverso l'adozione di corrette pratiche agronomiche (Hou *et al.*, 2000).Le maggiori perdite azotate e la mancanza dell'effetto della sommersione sull'emergenza e la crescita di alcune temibili malerbe, inoltre, richiedono un incremento dei mezzi di produzione. Se da una parte la coltura risulta maggiormente resistente agli attacchi del fitofago *Lissorhoptrus oryzophilus*, di recente introduzione in Italia e che necessita di condizioni di risaia sommersa per la deposizione delle uova e la crescita delle larve (Lupi e Colombo, 2005), dall'altra, la maggiore suscettibilità della coltura alla Piriculariosi, favorisce un uso più intenso dei trattamenti fungicidi.

Secondo dati diffusi dall'Ente Nazionale Risi (Figura 1.3), dal 2004 al 2011 la tecnica della semina interrata a file e sommersione ritardata ha registrato, in termini di superfici coltivate, un costante incremento, sino a interessare più del 30% delle superficie risicola nazionale, con punte percentuali considerevoli nelle Provincie di Pavia e Milano (ENR, 2013). Tra il 2011 e il 2012, sempre secondo dati forniti dall'Ente Nazionale Risi, tale trend in crescita ha subito una flessione probabilmente a causa di un particolare andamento metereologico che ha permesso di disporre di una maggior volume idrico al momento della semina.

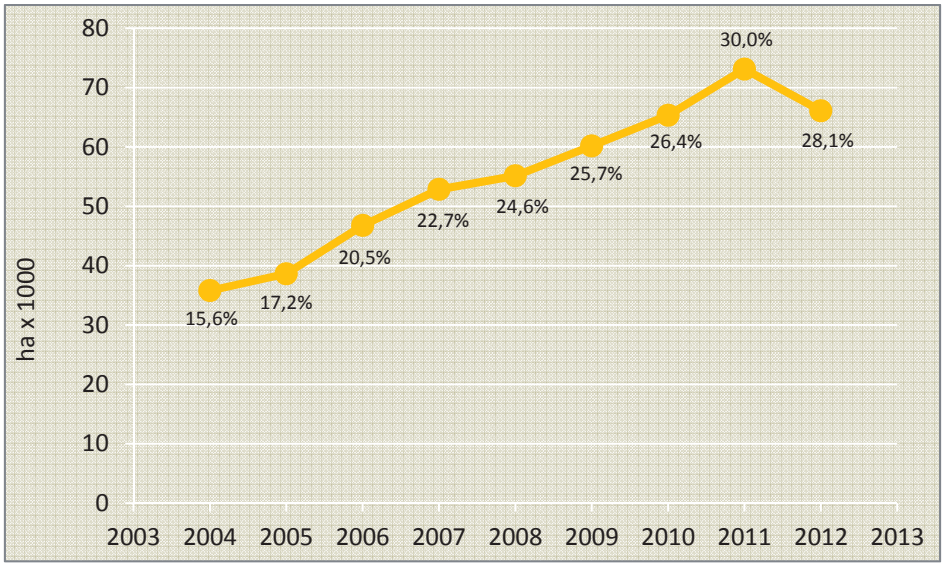


Figura 1.3. Ettari coltivati a riso in Italia con la tecnica della semina interrata e riferimento percentuale rispetto al totale della superficie.(Ente Nazionale Risi, 2013)

La tecnica della semina interrata seguita da interventi irrigui effettuati in momenti di necessità delle coltura che tende ad assimilare il riso alle principali colture irrigue (prima fra tutte il mais); tale tecnica è adottata in zone limitatissime come ad esempio nelle fasce di rispetto previste dai regolamenti regionali, quindi, nei nostri ambienti esiste scarsa esperienza a proposito di tale tecnica. Diversamente da quanto accade per la fascia temperata, in molte aree risicole del pianeta la coltura aerobica del riso invece è largamente diffusa. In questi casi ci si avvale di varietà particolarmente adatte al suolo aerobico e soprattutto in grado di tollerare le condizioni di scarsa disponibilità di acqua che si instaurano in campo tra una irrigazione e quella successiva. Scarse informazioni esistono a proposito di queste proprietà per quanto riguarda il germoplasma di riso italiano. Negli anni passati sia i ricercatori del Centro Ricerche sul Riso dell'Ente Nazionale Risi sia quelli del Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura hanno svolto indagini in tal senso. I risultati ottenuti, nonostante abbiamo portato anche alla identificazione di varietà piuttosto adatta quale Prometeo (ENR), nel loro insieme segnalano come il panorama varietale nazionale sia in larga parte scarsamente adatto alle condizioni di coltivazione aerobica. Pertanto l'identificazione delle varietà di riso che meglio si adattano alle condizioni di aerobiosi è un importante obiettivo (Greppi et al., 2007; Cavalluzzo et al., 2012).

Oltre ad approfondire gli aspetti di tolleranza dei genotipi italiani a periodi di aerobiosi del suolo in termini di effetti sulla produttività è alquanto importante acquisire informazioni sulle eventuali conseguenze di tale condizione su tratti qualitativi della granella quali composizione minerale, salubrità per il consumatore e valore nutrizionale riferito ad eventuali composti nutraceutici. Caratteri questi per i quali l'attenzione del consumatore è in forte aumento. Lo stato di ossigenazione dei suoli infatti influenza i cicli biogeochimici

degli elementi nutritivi, l'attività delle comunità microbiche edafiche nonché lo sviluppo e la fisiologia degli apparati radicali, aspetti in grado di condizionare fortemente la produttività delle colture e le qualità del prodotto finale. Una limitata disponibilità di acqua durante la fase di riempimento della granella condiziona i modelli spaziali di distribuzione delle sostanze all'interno della pannocchia e del loro accumulo nelle singole cariossidi con ricadute su aspetti quali-quantitativi delle produzioni (Chen et al., 2012; Cheng et al., 2003; Zhang et al., 2008; Fofana et al., 2010). Tali aspetti, ampiamente indagati nel caso delle varietà asiatiche sono del tutto sconosciuti per le varietà di riso temperato coltivate in Italia.

Nonostante l'origine subtropicale del riso, la coltura di questo cereale si è estesa in vaste aree del pianeta caratterizzate da diverse condizioni climatiche, come quelle a clima temperato dell'Europa. Sebbene il riso si sia ben adattato ai climi temperati dell'Europa, la sua coltivazione necessita di temperature idonee, al di sotto (10-12 °C) e al di sopra (33-35 °C) delle quali si manifestano drastiche riduzioni della fertilità delle spighette a causa di un arresto dello sviluppo del polline. Temperature al di sopra dei 33-35 °C sono particolarmente negative durante l'antesi e l'impollinazione in quanto riducono a vitalità e la germinabilità del polline maturo. Tra i diversi genotipi di riso esiste una grande variabilità nella tolleranza alle alte temperature (Jagadish et al., 2010). Anche se i genotipi considerati estremamente sensibili alle alte temperature, ovvero quelli la cui fertilità crolla anche al di sotto del 10%, sono relativamente pochi, la maggior parte delle varietà subisce comunque un calo di resa notevole. Seppur lo stress da alte temperature in fioritura non sia generalmente considerato come uno dei fattori di rischio nella risicoltura italiana, sono tuttavia noti fenomeni di sterilità dovuti a queste condizioni. E' quindi importante caratterizzare meglio l'effetto di questo stress abiotico nella realtà produttiva italiana, tenendo anche in considerazione il probabile aumento delle temperature previsto per i prossimi decenni. Nella coltura in sommersione la massa d'acqua presente oltre a fungere da volano termico evita che si instaurino limitazioni nella traspirazione che tenderebbero ad innalzare la temperatura nei tessuti della pianta. Questo effetto di termoregolazione può ridursi drasticamente nella coltivazione in aerobiosi che quindi richiede l'impiego di genotipi di riso adatti.

I genotipi di riso appartenenti al gruppo varietale noto come Aus, presenti nel subcontinente indiano, sono una importante fonte di caratteri di resistenza agli stress abiotici (Bailey-Serres et al., 2010; Gamuyao et al., 2012; Reddy et al., 2009). In particolare, la varietà tradizionale N22 si è affermata come riferimento, in ambito sperimentale e nei programmi di miglioramento genetico, per la sua resistenza sia alla carenza idrica sia alle alte temperature (Jagadish et al., 2008, 2010; Reddy et al., 2009). La definizione delle determinanti geniche che attribuiscono queste caratteristiche alla varietà N22 potrebbe fornire utili indicazioni per programmi di miglioramento genetico delle varietà italiane finalizzati a conferire alla pianta una maggior tolleranza allo stress termico.

Anche l'incremento dell'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) è un requisito fondamentale per favorire lo sviluppo di nuove varietà adatte alla coltivazione in anaerobiosi (Babu *et al.*, 2003; Bernier *et al.*, 2007). Un incremento della WUE dipende anche dalla possibilità di incidere su meccanismi adattativi che attraverso uno sviluppo adeguato dell'apparato radicale rendono accessibile per la pianta l'umidità presente negli strati più profondi del suolo e/o su processi che consentono di limitare, soprattutto in occasione di una scarsa disponibilità idrica, la perdita d'acqua per traspirazione riducendo la conduttività stomatica (Fukai and Cooper, 1995). Lo sviluppo di un apparato radicale più vigoroso e profondo in condizioni di crescita del riso su suolo aerobico è cosa nota. Alquanto complessa è la dissezione dei meccanismi molecolari di tale effetto e ciò complica la programmazione di interventi migliorativi. L'ottimizzazione della modulazione dell'apertura/chiusura degli stomi in funzione delle diverse condizioni colturali è una strategia che può invece rilevarsi vincente per il miglioramento della tolleranza delle specie coltivate a periodi intermittenti di carenza idrica e all'incremento della WUE (Schachtman and Goodger, 2008). La conoscenza dettagliata dei meccanismi fisiologici e molecolari che regolano l'attività stomatica costituisce quindi un presupposto

fondamentale per la definizione di strategie innovative di *breeding* per il miglioramento della produttività in condizioni di stress idrico e più in generale per limitare il consumo d'acqua da parte delle piante coltivate. La conoscenza in sistemi modello (ad esempio *Arabidopsis thaliana*) di geni, vie metaboliche e vie di trasduzione del segnale, coinvolti a diverso livello nella regolazione dell'attività stomatica, rappresenta un valido fondamento per l'identificazione e la caratterizzazione dei corrispettivi meccanismi in riso (Galbiati et al., 2008; Galbiati et al. 2011; Cominelli et al. 2013).

Sono definiti *Plant Growth Promoting Bacteria* (PGPB) i batteri in grado di esplicare un'azione positiva sulla crescita delle piante proteggendole dagli attacchi dei patogeni, influenzandone il bilancio ormonale, aumentando la disponibilità nel suolo di alcuni nutrienti minerali essenziali (N, P, Fe) o agendo in modo specifico sui processi di adattamento agli stress abiotici a cui sono esposte (Yang et al., 2009). Riferendosi a quest'ultimo effetto, in un'ottica di mitigazione degli impatti sulle produzioni determinate dagli attesi cambiamenti climatici o, più semplicemente, dall'adozione di tecniche di coltivazione indirizzate al risparmio della risorsa idrica, potrebbe rivelarsi particolarmente interessante la cosiddetta *habitat adapted symbiosis* (Rodriguez et al., 2008). Questo fenomeno si realizza attraverso processi di coevoluzione tra microorganismi (rizosferici o endofiti) e piante che conferiscono a quest'ultime tolleranza a stress specifici di un determinato habitat.
In condizioni di carenza idrica uno dei meccanismi batterici coinvolti nei processi di adattamento e protezione della pianta consiste ad esempio nella produzione di enzimi che alterano i livelli di etilene nei tessuti vegetali alleviando così gli effetti dello stress migliorando la produttività e il rendimento economico delle colture (Zahir et al., 2007). In condizioni di carenza idrica, anche la produzione di esopolisaccaridi batterici è un ulteriore e importante meccanismo di resistenza allo stress, poiché influenza la macroaggregazione e la tessitura del suolo aumentandone così la capacità di ritenzione idrica. La possibilità di sfruttare la comunità batterica naturalmente associata a piante di riso e capace di proteggere la pianta da condizioni di stress nel contempo promuovendone la crescita può rappresentare una soluzione eco-sostenibile nel caso di introduzione di tecniche irrigue volte al risparmio della risorsa idrica.

2. Obiettivi

La ricerca è stata finalizzata alla valutazione di interventi per la razionalizzazione delle attuali pratiche agronomiche e irrigue e per l'innovazione dei sistemi gestionali, sulla base delle esigenze economiche di produttività, di gestione delle risorse e dei mezzi di produzione, nonché dell'impatto delle più sostenibili forme di coltivazione sull'ambiente, sul territorio e sulla qualità delle produzioni. Particolare attenzione è stata dedicata anche alla valutazione degli effetti di sistemi alternativi di gestione irrigua della risaia su alcune caratteristiche nutrizionali e di salubrità della granella prodotta, all'individuazione di strumenti genetici utili per la selezione di genotipi di riso adatti a tecniche di coltivazione che riducano i consumi della risorsa irrigua, nonché di consorzi batterici che favoriscono lo sviluppo delle piante in condizioni di limitata disponibilità di acqua.

Lo studio si è prefissato l'obiettivo di definire vantaggi e svantaggi delle diverse tecniche in relazione alle specifiche condizioni operative ed ambientali, con la precisa volontà di fornire percorsi tecnici per l'orientamento delle scelte gestionali e per la conseguente pianificazione sul territorio. In tale contesto, il prodotto della ricerca potrà divenire un valido strumento di indirizzo alle evoluzioni delle normative della PAC e del PSR. Considerate le diverse professionalità necessarie per la caratterizzazione dei "sistemi colturali" si è adottato un approccio multidisciplinare, che ha previsto la collaborazione di idraulici agrari, agronomi, chimici agrari e pedologi, fisiologi vegetali, biologi molecolari, microbiologi ed economisti. Di primaria importanza è risultata l'individuazione delle potenzialità produttive dei tre sistemi alternativi di coltivazione del riso in relazione alla tipologia di semina e alla gestione dell'acqua. Tali risultati sono stati affiancati anche dall'analisi delle principali caratteristiche merceologiche, nutrizionali e di salubrità sul prodotto finale, che sono sempre più determinanti per un suo favorevole collocamento sul mercato.

Gli aspetti ambientali sono stati indagati a due diverse scale: di parcella e di distretto. A scala parcellare sono stati considerati gli effetti delle diverse tecniche di coltivazione sul consumo di acqua irrigua e sulla contaminazione delle acque superficiali e profonde da nitrati. L'attività si è svolta in concomitanza con lo studio sull'efficienza della concimazione azotata, in modo da interpretare alcuni elementi determinanti del ciclo dell'azoto in risaia. Con la finalità di impostare linee guida per il controllo integrato di malerbe, fitofagi e parassiti fungini sono state monitorate le intensità e le composizioni delle popolazioni infestanti, la presenza del fitofago *Lissorhoptrus oryzophilus* Kushel e gli attacchi del principale patogeno del riso *Pyricularia oryzae* Cavara.

A scala di distretto sono stati valutati gli effetti della diffusione dei diversi sistemi di coltivazione sui fabbisogni irrigui complessivi, sia in termini di volumi stagionali, sia della loro distribuzione nel tempo. Sono state inoltre considerate le conseguenze sulla ricarica della falda acquifera e le prevedibili variazioni dei livelli di quest'ultima. Per lo stesso distretto, è stata analizzata l'attuale situazione economico-produttiva del sistema risicolo, con lo specifico obiettivo di effettuare una valutazione economica della risorsa idrica ad uso irriguo dei diversi sistemi irrigui - tradizionali ed alternativi - ivi presenti. Inoltre, allo scopo di valutare i possibili effetti dell'introduzione di nuove soluzioni gestionali nel governo dell'acqua aziendale (in termini di costi, margini lordi, superfici coltivate), si è proceduto ad effettuare analisi di scenario per esaminare, identificare e caratterizzare alternative ed innovazioni che permettano alle aziende di adattarsi a differenti condizioni di sistema ad esse esterne, senza tuttavia dover rinunciare ad una parte consistente del proprio reddito.

La probabile scarsa adattabilità delle principali cultivar di riso italiane a condizioni diverse dalla sommersione continua impone, qualora ci si orienti verso soluzioni alternative della gestione irrigua della risaia rispetto a quelle attualmente predominanti, lo sviluppo di adeguate innovazioni varietali. L'individuazione di determinanti geniche favorevoli alla crescita e produzione delle piante in periodi di

limitata disponibilità d'acqua, nonché in assenza degli effetti microclimatici indotti dalla presenza del battente d'acqua sul suolo, potrebbe rivelarsi utile in programmi di miglioramento genetico per la costituzione di varietà adatte alla messa a punto di agrotecniche a bassa richiesta d'acqua. Identificando la regolazione stomatica e la suscettibilità del polline a temperature relativamente elevate come due processi che condizionano rispettivamente l'efficienza d'uso dell'acqua e la produttività delle colture in caso di limitata disponibilità idrica, sono state condotte indagini per l'identificazione di geni alla base dei due processi. L'obiettivo di tali attività è l'identificazione di marker molecolari utili alla selezione di genotipi di riso, adatti ai nostri areali di coltivazione, in grado di garantire standard produttivi elevati anche se coltivati in condizioni diverse dalla sommersione continua dei suoli.
Infine, è stata sviluppata una linea di ricerca diretta alla identificazione di consorzi microbici endofiti o rizosferici che sulla base del principio della cosiddetta *habitat adapted symbiosis* forniscano a genotipi specifici di riso protezione nei confronti di condizioni di stress prevedibile nei momenti di scarsa disponibilità di acqua nelle condizioni di coltivazione aerobica. L'inoculo dei semi delle varietà già in uso con questi consorzi potrebbe fornire alla pianta caratteri aggiuntivi di adattabilità generale a condizioni ambientali avverse.

Sinteticamente gli obiettivi specifici perseguiti dalle singole attività di ricerca sono così elencabili:

- ✓ Valutare la variazione dei flussi di ricarica verso la falda superficiale prodotti dalle nuove pratiche irrigue e colturali in modo da trarre considerazioni e indicazioni operative di carattere generale, applicabili all'intero territorio di pianura lombardo.
- ✓ Definire le pratiche irrigue correntemente utilizzate in risicoltura e valutare le conseguenze della loro variazione sulla gestione del sistema irriguo alla scala di distretto.
- ✓ Effettuare una valutazione agronomica ambientale di sistemi alternativi di gestione dell'acqua di irrigazione in risaia e identificare i genotipi più adatti alla coltivazione aerobica.
- ✓ Effettuare una valutazione economica della risorsa idrica ad uso irriguo nel caso delle diverse pratiche irrigue e colturali, valutando inoltre gli effetti dell'introduzione di nuove soluzioni gestionali nel governo dell'acqua a scala aziendale.
- ✓ Sviluppare sistemi innovativi per la selezione di varietà di riso adatte alla coltivazione aerobica ricorrendo ad approcci metabolomici e ionomici.
- ✓ Valutare gli effetti della temperatura sulla fertilità del riso allevato in condizioni di aerobiosi e identificare geni utili alla selezione di varietà tolleranti.
- ✓ Selezionare colture batteriche con attività di protezione delle piante dallo stress idrico.
- ✓ Sviluppare sistemi innovativi per la selezione di varietà di riso ad elevata efficienza d'uso dell'acqua e tolleranti la riduzione della disponibilità idrica.

3. Attività svolte

Le attività di sperimentazione si sono concentrate nei campi sperimentali allestiti presso l'Ente Nazionale Risi (ENR) a Castello d'Agogna (Pavia) e presso la sede del CRA-RIS di Vercelli. Il distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina (Pavia) è stato inoltre oggetto di analisi e valutazioni economico-produttive ed idraulico-irrigue.

La Figura 3.1 illustra la posizione dei due siti sperimentali e del distretto irriguo campione, tutti localizzati nel comprensorio risicolo della pianura padana centro-occidentale.

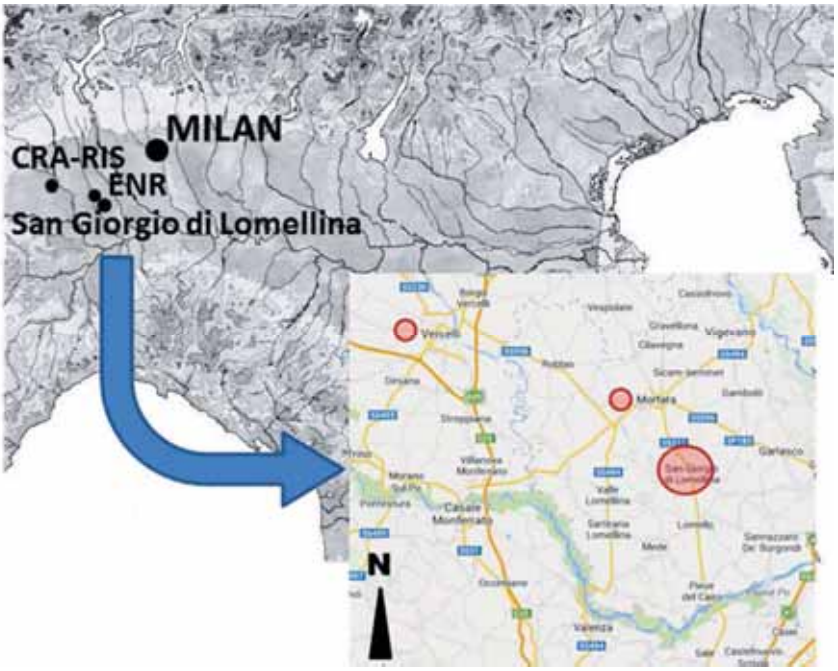


Figura 3.1. Posizione dei siti sperimentali ENR di Castello D'Agogna, CRA-RIS di Vercelli e del distretto irriguo di S. Giorgio Lomellina nella pianura padana occidentale

3.1 I siti sperimentali

3.1.1 Il sito sperimentale ENR di Castello D'Agogna (PV)

Il primo sito sperimentale si trova presso l'Ente Nazionale Risi (ENR) a Castello d'Agogna (PV), dove sono stati confrontati tre sistemi di coltivazione del riso in relazione alle modalità di semina e gestione dell'acqua:

- Semina in acqua e sommersione continua (FLD);
- Semina interrata e sommersione in 3°- 4° foglia (DRY);
- Semina interrata ed irrigazione intermittente (riso aerobico) (IRR).

Per ognuna delle tecniche considerate sono state allestite due camere di dimensioni pari a circa 2.000 m^2 a gestione irrigua indipendente, garantendo così due repliche per ognuno dei sistemi (Figura 3.2). Il confronto, che ha coinvolto quattro varietà rappresentanti i gruppi merceologici più diffusi in Italia e modelli di pianta ad habitus differente, ha riguardato l'efficienza della concimazione azotata e di uso dell'acqua, gli effetti sulla qualità delle acque e sull'entità della ricarica della falda acquifera superficiale, l'intensità e le composizioni delle popolazioni infestanti, nonché le produzioni, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo.

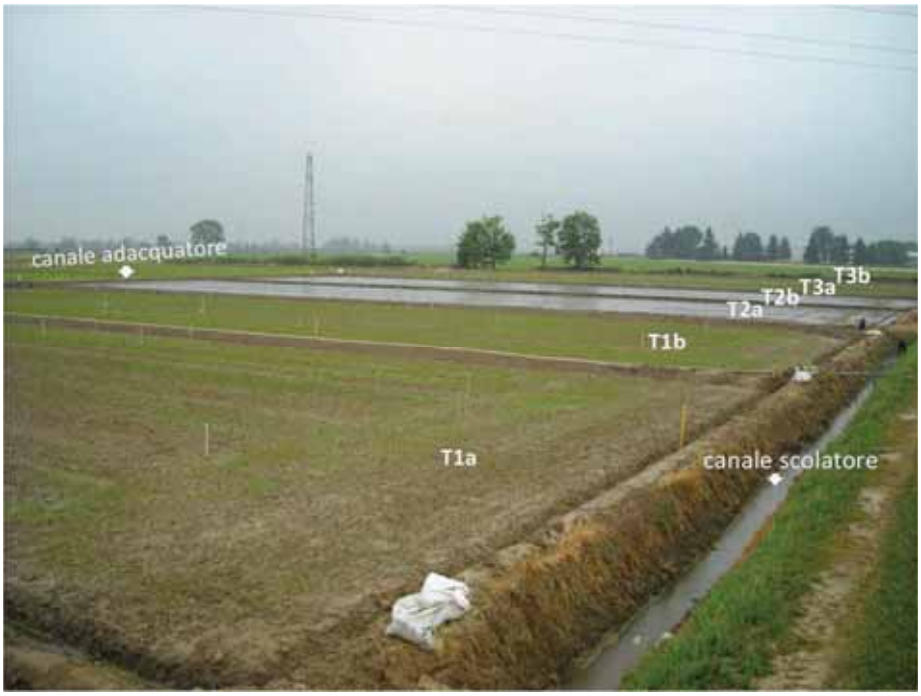


Figura 3.2. Sito sperimentale di Castello d'Agogna nelle prime fasi del ciclo colturale

3.1.1.1 Caratteristiche meteo-climatiche del sito

Il sito sperimentale di Castello D'Agogna è caratterizzato da un clima temperato ad estate calda (Cfa) secondo il sistema di classificazione di Koppen (Koppen e Geiger, 1936). Le variabili meteorologiche standard (pioggia, radiazione globale, temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento), a cui si aggiunge la radiazione netta, vengono misurate a passo orario su una copertura erbosa da una centralina agrometeorologica della rete gestita da ARPA-Lombardia situata all'interno della sede di ENR, a circa 100 m dalle parcelle sperimentali. Durante il semestre agrario (aprile-settembre) la temperatura media nel sito sperimentale è di circa 20 °C, mentre le precipitazioni si aggirano attorno ai 360 mm, con una marcata variabilità di anno in anno. L'umidità è sempre elevata e comporta la presenza di mesi nebbiosi durante la stagione invernale e mesi caldo-afosi in quella estiva. La Figura 3.3 mostra l'andamento delle variabili meteorologiche misurate presso la stazione di Castello d'Agogna nel corso degli ultimi 21 anni (1993-2013).

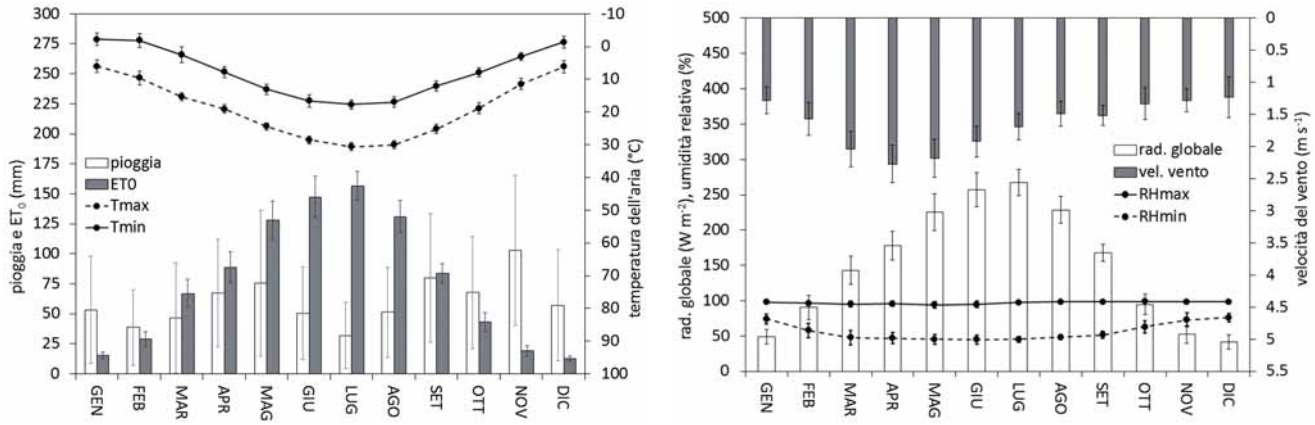


Figura 3.3. Medie e deviazioni standard dei valori mensili dei principali parametri climatici a Castello D'Agogna negli ultimi 21 anni (1993-2013). Per la pioggia ed ET_0 è riportato il valore cumulato mensile, mentre per gli altri parametri (umidità e temperatura dell'aria, radiazione globale, velocità del vento) è illustrata la media mensile

3.1.1.2 Caratteristiche pedologiche del sito

Con l'obiettivo di definire le tipologie di suolo che si riscontrano nelle sei parcelle sperimentali (caratteristiche e variabilità spaziale) ed avere un supporto per la progettazione del disegno sperimentale e per l'analisi dei dati osservativi, nel febbraio – marzo 2012 si è condotta un'indagine pedologica di dettaglio. In particolare, sono state aperte 5 trincee esplorative e condotte 18 prospezioni con trivella manuale di tipo olandese per ciascuna parcella, per un totale di 112 punti di osservazione (Figura 3.4). Le trincee esplorative sono state aperte nelle immediate vicinanze delle parcelle sperimentali per non compromettere la velocità di infiltrazione dell'acqua e falsare i consumi irrigui delle parcelle interessate dallo scavo. Per ogni orizzonte genetico descritto sono stati prelevati campioni disturbati e indisturbati: questi ultimi sono stati utilizzati per la misura della densità apparente; sugli altri si sono determinati in laboratorio i seguenti parametri: tessitura apparente, pH in acqua, carbonio organico, azoto totale, capacità di scambio cationico, basi di scambio.

Le prospezioni con trivella sono state eseguite seguendo il disegno sperimentale riportato in Figura 3.5. Oltre alla descrizione dei consueti parametri morfo-pedologici di ciascun orizzonte sino alla profondità di 120 cm si sono prelevati campioni per la determinazione delle classi tessiturali (e talvolta del carbonio organico) a profondità fisse desunte dalla media delle profondità degli orizzonti dei profili di riferimento: nello strato superficiale (0-35 cm) e alle profondità di 40-75 cm e oltre 90 cm, rispettivamente corrispondenti agli orizzonti Ap, B e C del suolo, per un totale di 321 campioni.

Figura 3.4. Particolari dell'apertura e della caratterizzazione delle trincee esplorative e della esecuzione delle prospezioni con trivella manuale

I risultati dello studio hanno portato ad una carta pedologica di dettaglio (Figura 3.5). La rappresentazione cartografica dei suoli si è basata principalmente sulla distribuzione delle classi tessiturali cui si è associato l'andamento del carbonio organico con la profondità. Sono così state individuate cinque tipologie principali di suolo: S, LF, LA, C-LF, C-LA.

I suoli LF (Limoso Franchi) sono caratterizzati da tessiture franco limose o franche in varia combinazione nei differenti orizzonti ma con tenori di argilla sempre inferiore al 27%. Questa tipologia è riconducibile principalmente agli Aeric Epiaquepts limosi o franco grossolani descritti in due delle trincee aperte (USDA, 2010). I suoli della tipologia LA (Limosi Argillosi) sono caratterizzati da tessiture franche o franco limose nell'orizzonte di superficie, e da orizzonti franco argilloso limosi o franco argillosi (argilla maggiore del 27%) nello strato medio o in profondità. Sono suoli raccordabili agli Aeric Epiaqualfs limosi fini analizzati in una delle trincee aperte. I suoli della tipologia S (Sabbiosi) interessano la parte degli appezzamenti più prossima al canale adacquatore: sebbene non presentino particolari diversità tessiturali negli orizzonti superficiali lavorati rispetto agli altri tipi di suolo circostanti, sono caratterizzati da orizzonti profondi sabbiosi o sabbioso franchi. Si tratta degli Aquic Ustipsamments mixed non calcarei mesici, rilevati nei restanti due profili pedologici descritti. Le ultime due tipologie di suolo (C-LF e C-LA) non si differenziano in termini di tessiture rispetto ai tipi LF e LA, ma identificano suoli caratterizzati da orizzonti ricchi di sostanza organica di colore scuro ben oltre l'orizzonte superficiale, con

tessitura da franca, a franco limosa, a franco limoso argillosa. Questi suoli non sono riconducibili direttamente ad alcuna delle trincee aperte.
Emerge con chiarezza dalle osservazioni il fatto che, diversamente dagli orizzonti sottosuperficiali, la cui casistica e caratteristiche costituiscono i principali elementi della variabilità riscontrata, gli orizzonti lavorati (Ap) presentano una sostanziale uniformità in tutti gli appezzamenti.

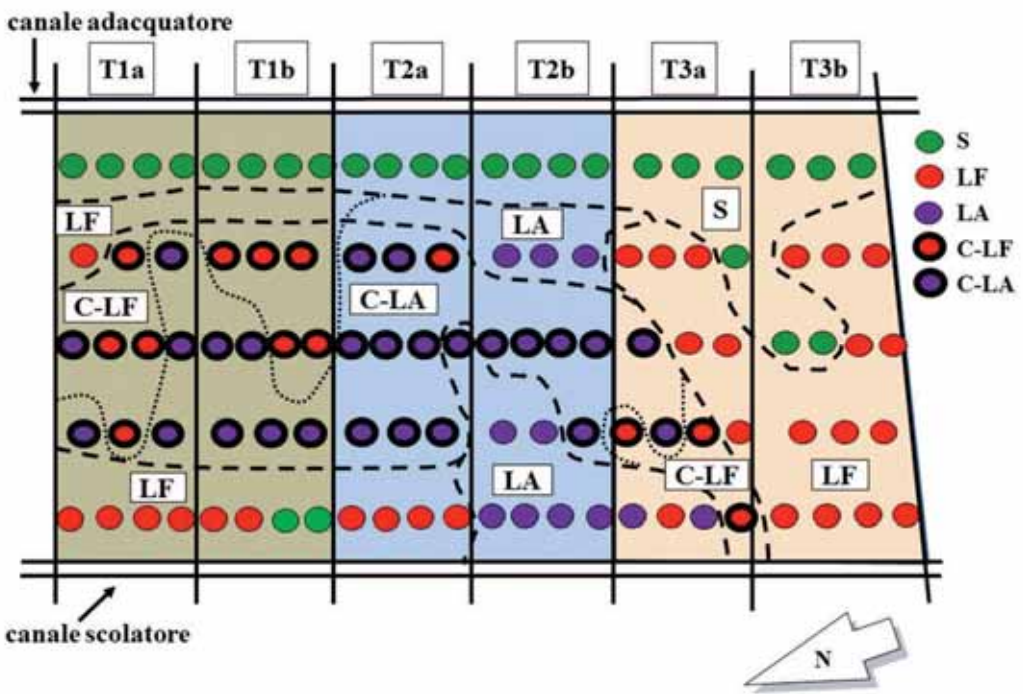


Figura 3.5. Distribuzione delle tipologie di suolo nelle parcelle sperimentali

Il suolo del sito ha una tessitura franco limosa (25,8% sabbia, 58,7% limo e 15,5% argilla) con le seguenti caratteristiche chimico-fisiche: pH_{H20}= 5,90; N_{tot} = 1,1 g kg^{-1}; C-org_{tot} = 4,3 g kg^{-1}; SO_{tot} = 13,1 g kg^{-1}; CEC = 7,1 $cmol^{+}$ kg^{-1}; Cd_{tot} = 0,50 mg kg^{-1}; As_{tot} = 11,0 mg kg^{-1}.

3.1.1.3 Disegno sperimentale

Per ognuno dei tre sistemi di coltivazione considerati sono state allestite due camere di dimensioni pari a circa 2.000 m^2 a gestione irrigua indipendente, garantendo così due repliche per ognuno dei trattamenti irrigui. Tre delle camere, una per ogni sistema di coltivazione, sono state strumentate con svariati sensori, con l'obiettivo di monitorare con continuità e al meglio delle possibilità tecniche i flussi idrici in ingresso ed in uscita.
Il disegno sperimentale, a split-split plot, hai poi previsto due altri ordini di fattori sperimentali. Nel sub-plot sono state considerate le seguenti quattro varietà:

- Gladio, genotipo afferente al gruppo denominato Tropical Japonica (Oka 1988) (o più comunemente a profilo Indica), a granello Lungo B cristallino, utilizzato per la parboilizzazione o commercializzato come riso bianco per contorni ed insalate. E' destinato principalmente per il mercato Nord-Europeo. Si tratta di una varietà precoce (130 gg circa), semidwarf, con medio-elevate esigenze azotate.
- Loto, possiede un granello Lungo A adatto alla parboilizzazione. Ha un ciclo precoce di circa 125 gg, è suscettibile alla Piriculariosi e dimostra medie esigenze per quanto riguarda la concimazione azotata. La pianta ha un'altezza al culmo di circa 70 cm ed è abbastanza resistente all'allettamento.
- Selenio, rappresenta le varietà a granello tondo utilizzate per la produzione di riso soffiato. Ha elevate capacità produttive conseguenti ad una buona capacità di accestimento ed ad un elevato numero di spighette per pannocchia. Nonostante la taglia media è suscettibile all'allettamento.

- Baldo, a granello Lungo A destinato alla preparazione dei risotti, è varietà a taglia alta, suscettibile all'allettamento e definita a medio-basse esigenze azotate.

Allo scopo di determinare l'efficienza della concimazione azotata con la tecnica del recupero apparente, nel sub-sub plot sono state previsti due trattamenti per quel che concerne il piano di concimazione azotata: il testimone senza alcun apporto del nutriente e la dose ottimale per ognuna delle varietà coltivate (Figura 3.6).

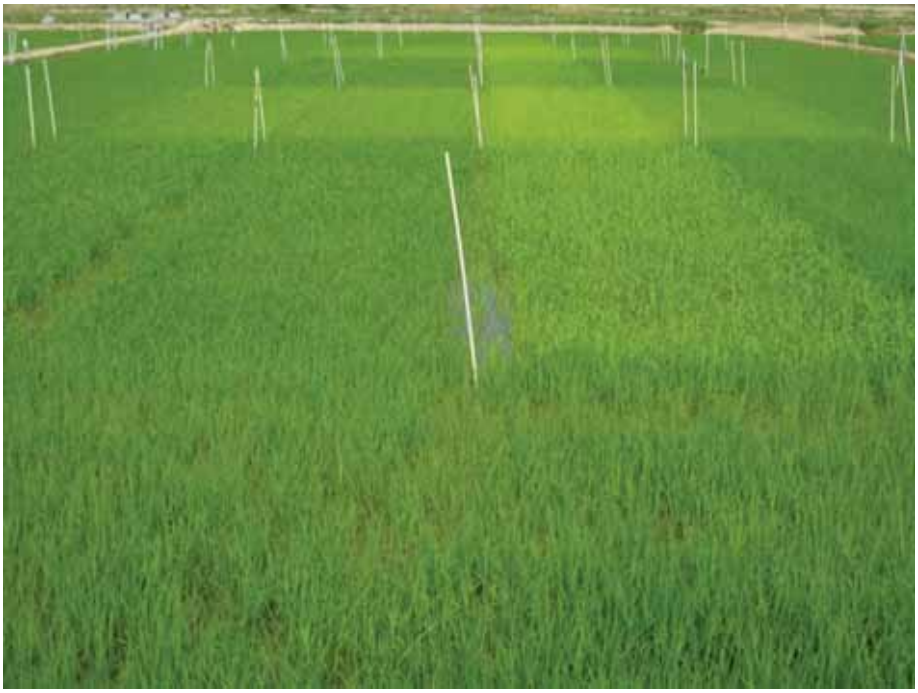


Figura 3.6. Parcelle varietali trattate e non con azoto in fase vegetativa

Ogni parcella delle dimensioni di 2.5 x 10 m è stata replicata 2 volte all'interno di ogni singola camera a gestione idrica indipendente. Nel caso del trattamento fertilizzato è stata aggiunta un'ulteriore parcella nella quale non sono stati applicati fungicidi ed insetticidi, in modo da poter rilevare la pressione delle principali avversità fungine e gli attacchi di insetti. Le parcelle per ogni camera risultano in tal modo essere 20. La superficie della camera che circonda le parcelle sperimentali è stata seminata a Gladio.

3.1.2 Il sito sperimentale CRA-RIS di Vercelli

Il secondo sito sperimentale (Figura 3.7) si trova presso l'Unità di Ricerca per la Risicoltura di Vercelli del Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura dove sono stati confrontati due sistemi di coltivazione del riso in relazione alle modalità di semina e gestione dell'acqua:

- Semina interrata e sommersione in 3°- 4° foglia (DRY);
- Semina interrata ed irrigazione intermittente (riso aerobico; IRR) somministrata al raggiungimento di un potenziale idrico del suolo di circa -40 kPa a una profondità di 20 cm.

Il confronto tra i due sistemi di gestione dell'acqua ha coinvolto per due stagioni successive (2011 e 2012) nove varietà di riso che comprendono le 4 classi merceologiche di interesse e ha riguardato: a) gli effetti sulla produzione, sull'assenza di difetti nella granella, la resa alla lavorazione industriale e, sui campioni di riso lavorato, il contenuto in amilosio e proteine; b) alcune caratteristiche agronomiche e parametri di produzione come il portamento della foglia paniculare, il tipo e portamento della pannocchia, il numero di culmi al m^2, l'altezza al nodo e totale, le date di fioritura e maturazione.

Figura 3.7. Sito Sperimentale di Vercelli; prova parcellare

3.1.2.1 Caratteristiche meteo-climatiche del sito

L'andamento termo pluviometrico nelle annate di svolgimento delle prove del progetto presso il CRA-RIS ha fatto registrare nel 2012 valori di temperatura massimi (raggiunti nei mesi di luglio-agosto) superiori a quelli rilevati per il 2011. L'ammontare delle piogge nel periodo vegetativo (da maggio a settembre) è risultato superiore nel 2012 (231 mm di pioggia) rispetto al 2012 (168 mm di pioggia).

3.1.2.2 Caratteristiche del suolo

La prova parcellare è stata condotta su un suolo franco (47,2% sabbia, 42,8% limo e 10% argilla) con le seguenti caratteristiche chimico-fisiche seguenti: pH_{H20}= 6,36; N_{tot} = 0,8 g kg^{-1}; C-org_{tot} = 9,3 g kg^{-1}; SO_{tot} = 16,1 g kg^{-1}; CEC = 10,8 $cmol^{+}$ kg^{-1}; Cd_{tot} = 0,46 mg kg^{-1}; As_{tot} = 9,8 mg kg^{-1}.

3.1.2.3 Disegno sperimentale

Per ognuno dei due sistemi di coltivazione e per le nove varietà di riso analizzate è stata allestita 1 camera di dimensioni pari a circa 800 m^2 a gestione irrigua indipendente. Nella camera a conduzione IRR il potenziale idrico del suolo a 20 cm di profondità era monitorato con tensiometri. La prova biennale ha considerato le varietà: Selenio, Centauro (per la classe dei risi Tondi), Loto (per la classe Lungo A da parboiled), Baldo, Carnaroli, Roma, Vialone Nano (per la classe Lunghi A da interno), Gladio, Salvo (per la classe Lunghi B). Ogni varietà è stata seminata in parcelle di 16 file di 7 metri di lunghezza e 3 metri di larghezza. Per tutte le varietà sono state realizzate tre repliche. Le semine sono state eseguite il 5-16 Maggio nel 2011 e 18 Maggio nel 2012 sia per la prova in sommersione sia per la prova di irrigazione turnata. Nel campo sperimentale in condizioni di aerobiosi, durante la stagione colturale (periodo da maggio a ottobre) sono stati effettuati 4 interventi di irrigazione nel 2011 e 3 interventi nel 2012.

La fertilizzazione per entrambe le prove (FLD e IRR) è stata effettuata in pre-semina ed ha previsto la somministrazione di 90 kg/ha di azoto e 70 kg/ha di P_2O_5. Entrambe le prove sono state trattate, in post-emergenza, con 3 diversi erbicidi: Aura+Dash+Clincher- Viper+Gulliver-Stam+Londax+Uk46, e sono stati effettuati trattamenti insetticidi con Contest

3.1.3 Il distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina

Il distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina è stato oggetto delle indagini per la valutazione degli effetti dell' adozione di diversi sistemi di coltivazione del riso sui fabbisogni irrigui complessivi, sia in termini di volumi stagionali, sia della loro distribuzione nel tempo. Si sono inoltre considerate le conseguenze sulla ricarica della falda acquifera superficiale e le prevedibili variazioni dei livelli di quest'ultima. Si sono infine effettuate valutazioni economico-produttive relative ai sistemi di coltivazione stessi.

Il distretto è stato selezionato in quanto soddisfa i seguenti requisiti:

1) la maggior parte della superficie è destinata a riso;
2) l'area è "idrologicamente" ben delimitata;
3) sono disponibili dati monitorati relativi alle principali grandezze idrologiche, ed in particolare i volumi irrigui in ingresso al distretto, i dati agrometeorologici, l'andamento della soggiacenza della falda freatica e l'uso del suolo.

3.1.3.1 Caratteristiche idrografiche del distretto

Il distretto (Figura 3.8) è delimitato ad ovest dal torrente Agogna e, ad una certa distanza ad est, dal torrente Terdoppio; è inoltre attraversato dal torrente Erbognone (o Arbogna).

La distribuzione delle acque irrigue nella zona è regolata dal Consorzio di Irrigazione e Bonifica Est Sesia (Ufficio Zonale di Mortara). Il distretto riceve acque praticamente solo da derivazioni superficiali che si distinguono in:

a) acque "pubbliche", se provenienti da derivazioni sul torrente Arbogna;
b) acque "del Consorzio", che provengono dal canale Cavour attraverso il sub-diramatore Mortara;
c) acque da fontanili a monte dell'area di studio: tra l'Agogna e l'Erbognone si trova infatti una zona irrigata da un fontanile chiamato cavo Plezza che convoglia le acque provenienti da fontanili localizzati a sud di Novara.

A sud del distretto, i coli, praticamente nulli nella stagione irrigua, sono raccolti dal canale Gattinera che, raggiungendo il torrente Agogna sulla sponda destra, lo attraversa con un tombotto e quindi prosegue in trincea verso il torrente Erbognone.

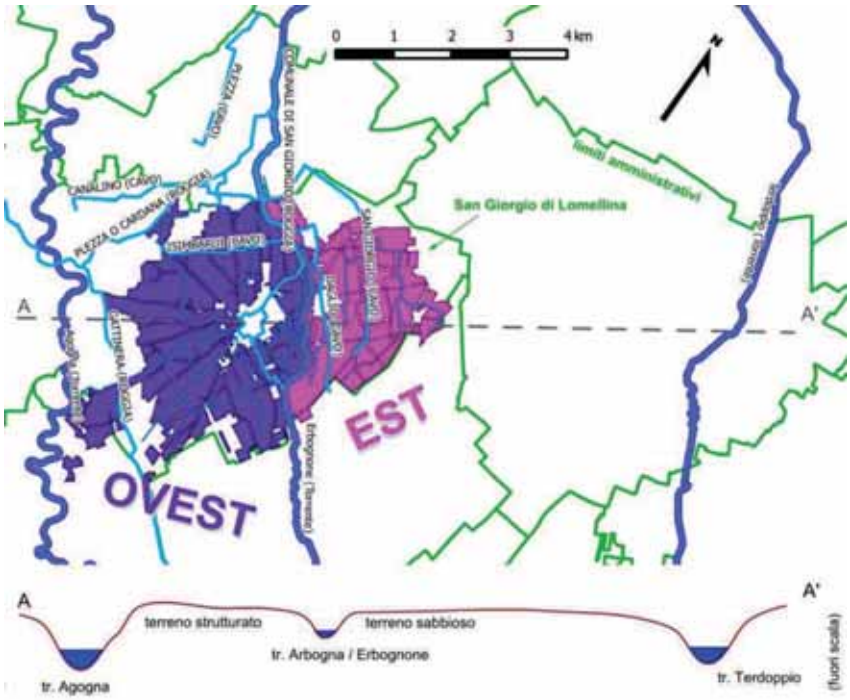


Figura 3.8. Schema del sistema idrografico del distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina

3.1.3.2 Caratteristiche pedologiche e uso del suolo

Il torrente Erbognone fa da confine tra le due tipologie principali di suolo presenti nel distretto: ad ovest i suoli sono di tipo franco, ben strutturati, con buona capacità ritentiva (Anthraquic Hapludalf coarse silty mixed mesic secondo la Soil Taxonomy, USDA 1975; ERSAL, 1993), mentre ad est prevalgono le tessiture sabbiose, caratterizzata da permeabilità più elevate (Argic Udipsamment mixed mesic; ERSAL, 1993).

La superficie servita da rete irrigua, calcolata su base cartografica fornita dal Consorzio, è di circa 1487 ha. Sulla base delle dichiarazioni SIARL 2011 è possibile ottenere una classificazione di dettaglio della distribuzione delle diverse colture e usi del suolo nel distretto (Figura 3.9). Il 76% della superficie sottoposta a dichiarazione è a risaie, il 16% è mais da granella mentre il rimanente 8% è suddiviso tra soia, prati , pioppeti e imboschimenti di cui il REG.(CE) N. 1257/99 Misura H (boschi in Figura 3.9) e da una serie di altre superfici non irrigue.

Le percentuali cambiano sensibilmente se si considerano distintamente i due settori del comprensorio, est e ovest (Figura 3.9, in basso). Nella porzione est, più piccola e con suolo più permeabile, il riso occupa poco più della metà (52%) della superficie totale mentre la rimanenza è dedicata a mais da granella (28%), boschi (12%), pioppeti (3%), erbai (1%) e altri usi non irrigui (4%). Nella porzione ovest, con suoli dotati di minore permeabilità, prevale invece il riso (86%), seguito dal mais da granella (11%) e la rimanenza suddivisa tra boschi, pioppeti, soia, prato polifita e altri usi non irrigui.

Con riferimento alla superficie complessiva coltivata a riso nel comune di San Giorgio di Lomellina per il periodo 2005-12, essa rimane grossomodo costante, subendo variazioni contenute entro il 10% della media del periodo.

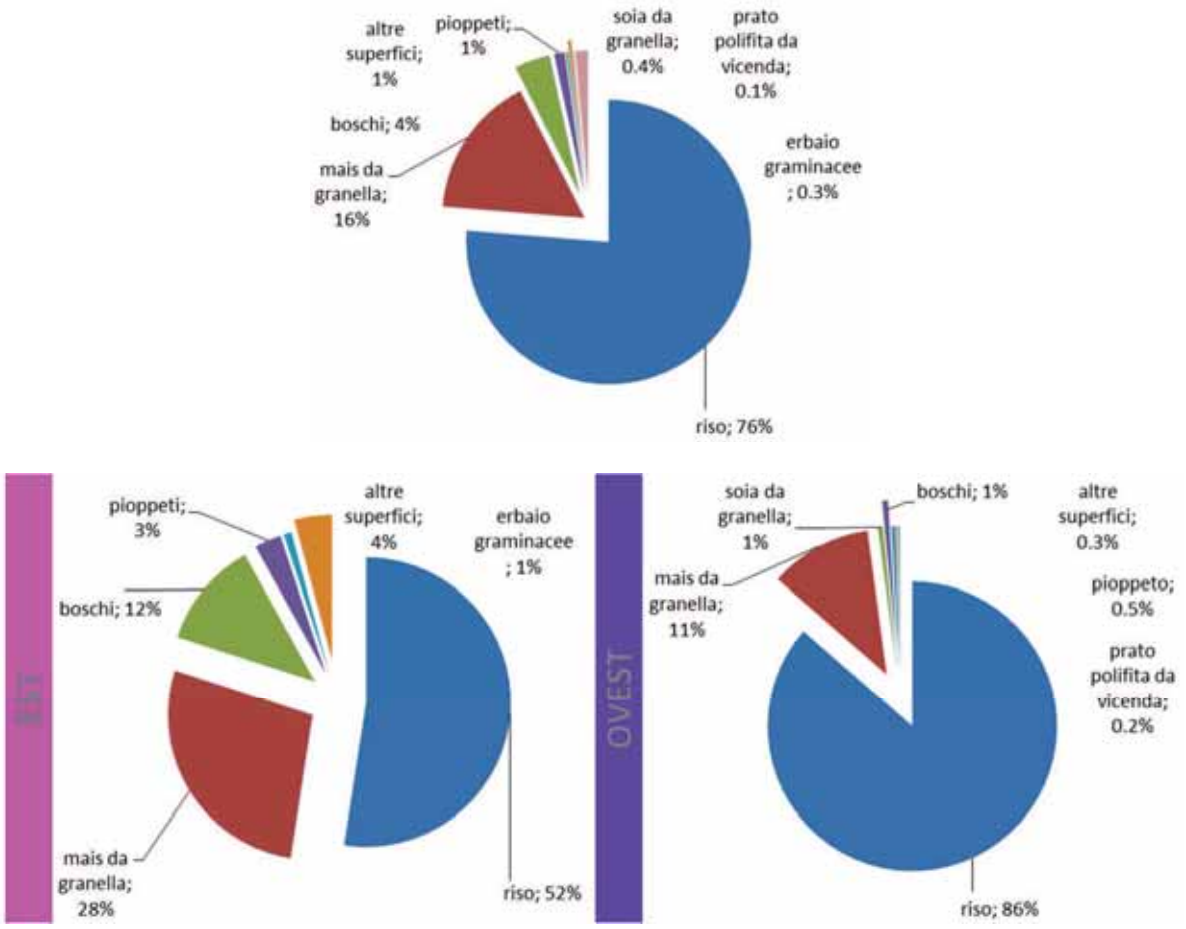


Figura 3.9. Distribuzione dei principali usi agricoli nel distretto, distinguendo in basso tra settore est ed ovest

3.1.3.3 Disegno sperimentale

La disponibilità dei dati idrologici è garantita dall'assidua attività di monitoraggio delle portate derivate e distribuite sul territori agricolo e dei livelli della falda freatica, condotta dal Consorzio Est Sesia, che ha fornito i dati e attivamente collaborato allo studio. Per quanto riguarda i dati agrometeorologici, essendo il distretto molto vicino alla centralina gestita da ARPA-Lombardia e localizzata presso la sede ENR di Castello D'Agogna, si sono utilizzate le serie di dati agrometeorologici da essa acquisite (Figura 3.3).

3.2 Aspetti specifici delle diverse attività

3.2.1 Indagini agronomico-colturali

Le attività illustrate in dettaglio in questo paragrafo riguardano il sito sperimentale ENR di Castello D'Agogna.

3.2.1.1 La tecnica colturale

La sperimentazione è stata condotta su un appezzamento tipico del territorio Lomellino, coltivato in precessione a riso in rotazione con soia.

Lavorazioni del suolo

L'appezzamento è stato interessato in entrambe le annate da un'aratura primaverile seguita, non appena raggiunte le condizioni di umidità ottimali, dal livellamento con lama laser.
Nel 2011, a causa della piovosità di aprile, tali operazioni sono state eseguite verso la fine del mese; mentre nel 2012 si è riusciti ad operare ad inizio stagione, consentendo anche l'effettuazione di un periodo di falsa semina sino alla metà di maggio.
Dopo il livellamento ogni anno sono stati costruiti gli argini con funzione delimitante delle sei camere, ognuno dei quali affiancato da due solchi di 20-25 cm di profondità, fondamentali per allontanare le acque di infiltrazione laterali qualora le due camere affiancate non fossero nelle stesse condizioni di regimazione idrica (Figura 3.10).
La preparazione del letto di semina è avvenuta con un unico passaggio di erpice rotante per le semine in acqua, praticato appena prima della sommersione, e due passaggi nelle semine interrate, uno dei quali in combinazione alla seminatrice. Anche nel caso della semina interrata, l'erpicatura è stata svolta in prossimità della semina in modo da non perdere eccessivamente umidità dal suolo ed evitare la germinazione delle malerbe prima dell'intervento di diserbo di pre-emergenza.

Figura 3.10. Livellamento laser (sopra) e costruzione argini (sotto)

La semina

Le operazioni di semina sono avvenute nella seconda metà di maggio, essendo le varietà utilizzate a ciclo precoce.
La semina interrata è stata anticipata di circa 10 giorni rispetto a quella in acqua, in modo da colmare le differenze nella lunghezza del ciclo tra i due sistemi (Tabella 3.1).
Le modalità di semina hanno previsto, nel caso dell'asciutta,

Tabella 3.1. Data di semina nelle due stagioni colturali

	Semina in acqua	Semina interrata
2011	26/5	16/5
2012	28/5	15/5

l'utilizzo della seminatrice Gaspardo, dotata di dischi assolcatori che permettono un buon interramento del seme anche in presenza di una certa zollosità; in acqua, invece, si è intervenuti manualmente, sfruttando la grande esperienza del personale del Centro Ricerche per realizzare semine uniformi (Figura 3.11).

Figura 3.11. Semina interrata (a) e semina in acqua (b)

Per quanto riguarda le dosi di seme distribuite, si sono mantenuti i medesimi quantitativi per entrambe le modalità di semina ed in entrambe le stagioni colturali (Tabella 3.2).
Nel 2012, a causa di una pioggia battente caduta successivamente alla semina in asciutta, l'eccessiva formazione di crosta superficiale del suolo ha reso necessario un intervento con rompicrosta onde evitare fallanze di emergenza.

Tabella 3.2. Dosi di seme utilizzate per le 4 varietà

	Dose di seme
	kg ha^{-1}
GLADIO	160
BALDO	130
SELENIO	150
LOTO	170

La gestione dell'acqua

Il programma irriguo si è differenziato nell'ambito delle tre tecniche a confronto. Nella Figura 3.12 sono rappresentati gli interventi irrigui ed i momenti di sommersione praticati nel 2011, 2012 e 2013. La gestione irrigua di quest'ultimo anno viene illustrata poiché le attività di monitoraggio dei flussi e degli invasi idrici nelle camere di risaia (Par. 3.2.2) è iniziata nel 2012 ed è continuata nel 2013. In tale anno, a causa dell'andamento meteorologico sfavorevole, tutte le operazioni sono state posticipate di alcune settimane tant'è che la semina in asciutta si è effettuata il 28 giugno e quella in acqua nella prima settimana di giugno (5 giugno).

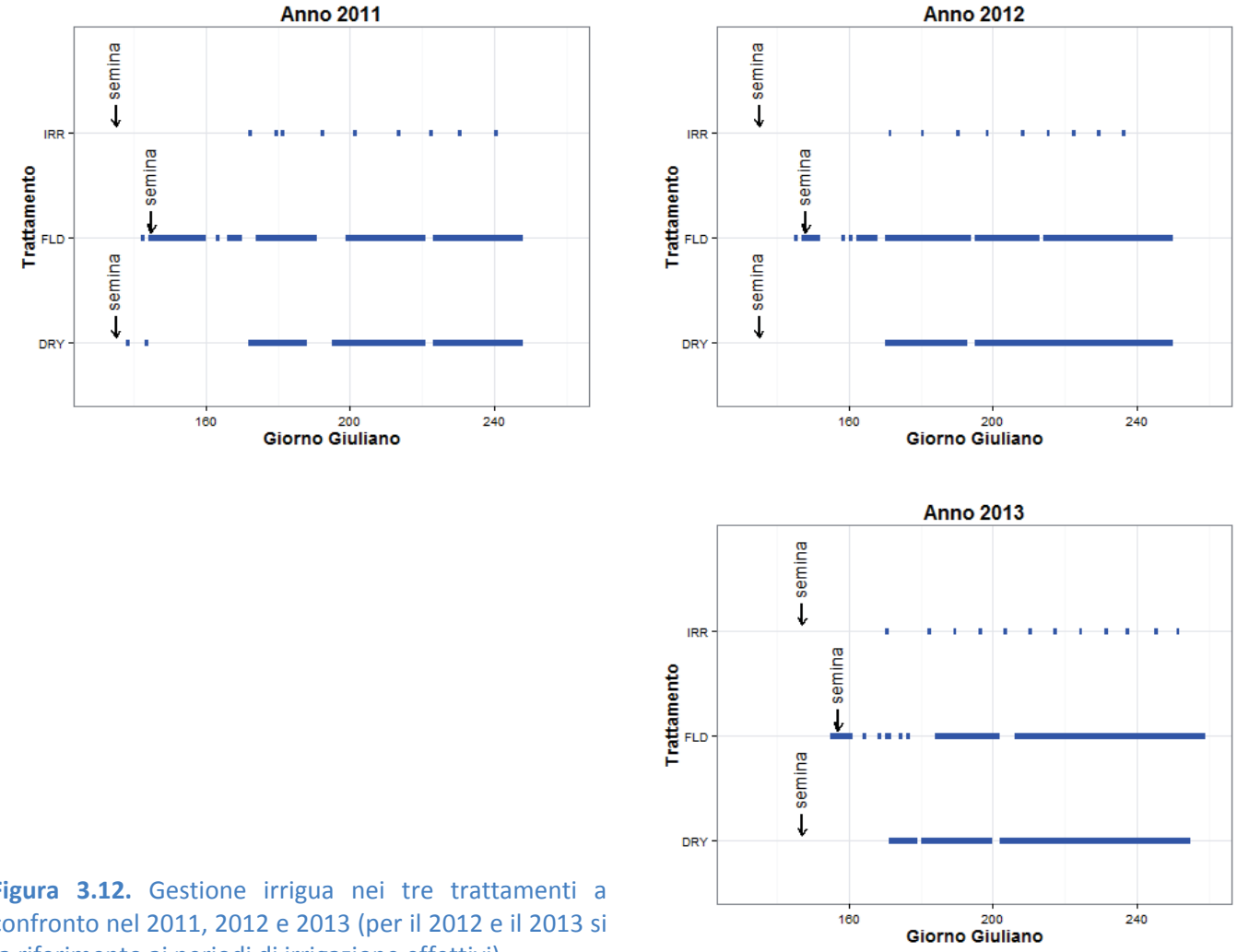


Figura 3.12. Gestione irrigua nei tre trattamenti a confronto nel 2011, 2012 e 2013 (per il 2012 e il 2013 si fa riferimento ai periodi di irrigazione effettivi)

La gestione dell'acqua in sommersione continua ha previsto l'allagamento per sole 24 ore il giorno prima della semina, al fine di consentire un "lavaggio" delle camere e ridurre i problemi di fitotossicità dovuti all'applicazione dell'erbicida oxadiazon in pre-semina (Figura 3.13). Tale tecnica ha consentito di ridurre i tempi tra la distribuzione del fitofarmaco, la sommersione e la semina, riducendo così i rischi di un'asciutta anticipata nel periodo di germinazione dei semi a causa della proliferazione di alghe, sempre molto alti in epoche a clima caldo.

La fase di germinazione è stata più lunga nel 2011, per cui l'asciutta di radicamento è avvenuta dopo circa 10 giorni dalla semina, rispetto ai 5-6 del 2012 e i 4 giorni nel 2013, che tuttavia è caratterizzato da un ritardo delle operazioni colturali, causa avverse condizioni meteorologiche primaverili. In tutte le annate, successivamente, vi è stato un susseguirsi di momenti di sommersione e di asciutta in modo da consentire un buon radicamento dei germinelli, evitare l'indurimento del suolo e controllare le alghe. Questo alternarsi di condizioni a differente regimazione idrica viene definito con gergo anglosassone "pint point".

Una volta raggiunto un buon insediamento della coltura ed una certa copertura da parte della canopy (metà giugno nel 2011-12 e fine giugno nel 2013), si è proceduto con l'asciutta necessaria per gli interventi di diserbo e di concimazione azotata. Trascorse 24 ore dall'intervento di concimazione si è ripristinato il normale livello dell'acqua sino al raggiungimento dello stadio di differenziazione della pannocchia, che, a seconda delle varietà è avvenuto tra l'11 ed il 17 luglio. In questo intervallo, dopo una breve asciutta, si è somministrata la terza dose di fertilizzante azotato e, quindi si è ristabilita la sommersione. Prima dell'asciutta definitiva di inizio settembre, è stato pianificato un altro breve momento in assenza della coltre d'acqua, intorno al 10 agosto nel 2011, in prossimità dell'intervento concimante di soccorso su Selenio, ed a fine luglio nel 2012 e 2013, in modo da consentire una maggiore lignificazione dei culmi e quindi ridurre la suscettibilità all'allettamento delle cultivar a taglia alta.

Figura 3.13. Momento dell'ingresso dell'acqua nelle camere

Per quanto concerne la tecnica con semina interrata e sommersione ritardata, l'allagamento delle camere è stato effettuato dopo la metà di giugno in tutti e 3 gli anni successivamente agli interventi di diserbo ed alla prima concimazione in copertura. La sommersione è quindi stata mantenuta per quasi tutto il ciclo colturale ad eccezione del periodo in cui è stata somministrata la seconda dose di concime, in fase di differenziazione della pannocchia, e, nel 2011, di un brevissimo intervallo nella prima decade di agosto, per consentire la fertilizzazione di soccorso della varietà Selenio.

Il regime irriguo del riso aerobico (IRR) è quello tipico di una coltura sottoposta ad irrigazioni periodiche. Il primo intervento irriguo avviene dopo circa 35-37 giorni dalla semina in tutte le annate, sebbene nel 2013 la semina sia avvenuta con due settimane di ritardo rispetto agli anni precedenti. Il turno ha una durata media di 7 giorni, per un totale di 9 interventi nel 2011-12 e 11 interventi nel 2013; quest'ultimo anno, infatti, è caratterizzato da una stagione agraria che inizia in ritardo ma si prolunga per più tempo.

La concimazione

La fertilizzazione azotata ha rappresentato un fattore sperimentale del programma di ricerca. Come descritto al paragrafo 3, i trattamenti hanno considerato il testimone non concimato e il fertilizzato con la dose ottimale per ogni genotipo.

Il piano di concimazione ha, però, subito un cambiamento tra il 2011 ed il 2012. Il programma iniziale ha avuto l'obiettivo di mantenere le colture nello stato ideale di nutrizione, per cui gli apporti sono variati, oltre che per le diverse varietà, anche nell'ambito dei tre programmi di gestione irrigua (Tabella 3.3). Dalla Tabella 3.3 si può osservare come nel caso della sommersione sia stato necessario un intervento di 20 kg ha^{-1} di N per sopperire alle difficoltà di insediamento della coltura, mentre, in fase di botticella, Selenio è stato concimato ulteriormente con 25 kg ha^{-1} di N in quanto ha mostrato un decremento del vigore.

Nel 2012, invece, ogni varietà è stata concimata con il medesimo quantitativo di azoto, indipendentemente dal sistema colturale. Ovviamente è rimasta differenziata la tipologia di frazionamento, che nel caso delle irrigazioni turnate ha considerato quattro momenti di intervento anziché i consueti tre. La mancanza di una sommersione continua, infatti, porta a maggiori perdite del fertilizzante azotato sia per i processi di nitrificazione e

denitrificazione sia per la volatilizzazione di ammoniaca in atmosfera. Ne consegue la necessità di somministrare dosi ridotte da localizzarsi appena prima delle irrigazioni.
Nella coltivazione con sommersione in 3°- 4° foglia, a differenza della sommersione continua, le dosi più elevate del nutriente sono state applicate a ridosso dell'allagamento della risaia, in modo da permettere un rapido superamento della fase di stress, consentire un rapido accestimento e ridurre al minimo le perdite.

Tabella 3.3. Dosi di azoto distribuite nel 2011 e nel 2012 (kg ha^{-1})

		FLD				DRY				IRR			
		Gladio	Baldo	Selenio	Loto	Gladio	Baldo	Selenio	Loto	Gladio	Baldo	Selenio	Loto
2011	Pre-semina	60	60	60	60	40	40	40	40	60	60	60	60
	Radicamento	20	20	20	20								
	Accestimento	60	30	40	40	80	50	60	60	60	30	40	40
	Diff. Pannoc.	40		30	30	50	30	40	40	40	20	30	30
	Botticella			25				25				25	
	Totale	**180**	**110**	**175**	**150**	**170**	**120**	**165**	**140**	**160**	**110**	**155**	**130**
2012	Pre-semina	60	40	50	50	40	30	40	40	50	40	40	40
	Accestimento	60	30	40	40	70	40	60	50	40	30	40	35
	Diff. Pannoc.	40	50	50	40	50	50	40	40	40	30	40	35
	Botticella									30	20	20	20
	Totale	**160**	**120**	**140**	**130**	**160**	**120**	**140**	**130**	**160**	**120**	**140**	**130**

Il concime utilizzato ha sempre previsto la forma ureica (Figura 3.14). Le applicazioni in pre-semina sono state eseguite in prossimità dell'erpicatura, ad un paio di giorni dalla semina, mentre in copertura, si è prestata attenzione a distribuire il fertilizzante su risaia asciugata ed a procedere con la sommersione dopo circa 24 ore in modo da ridurre al minimo le perdite per volatilizzazione di ammoniaca in atmosfera.
Il fosforo ed i potassio sono stati forniti esclusivamente in pre-semina, impiegando 400 kg ha-1 di un concime binario a titolo 0.14.28 (N, P_2O_5, K_2O) .

Figura 3.14. Concimazione parcellare

Trattamenti antiparassitari
Il programma degli interventi diserbanti è rappresentato nelle Tabelle 3.4 e 3.5. La tecnica della semina in acqua ha considerato un trattamento con oxadiazon in pre-semina, per il controllo di *Heteranthera reniformis*, ed un doppio passaggio ravvicinato in post-emergenza, per il contenimento dei giavoni e delle altre foglie larghe. La semina interrata si è differenziata per il posizionamento dell'oxadiazon in pre-emergenza, anziché in pre-semina, e per l'aggiunta a tale principio attivo del pendimethalin, per un miglior controllo delle Graminacee, ma solo nel 2012.
Nel secondo anno di sperimentazione, grazie al notevole lasso di tempo tra la preparazione del suolo e la semina, si è ritenuto opportuno un intervento con glifosate in pre-semina per la distruzione delle malerbe già emerse.

All'interno di ogni camera sono state delimitate due aree testimoni, di circa 12 m^2, in cui non sono applicati diserbanti al fine di monitorare la pressione infestante delle diverse specie (Figura 3.15).

Figura 3.15. Operazioni di diserbo con trattrice (a sinistra) e con attrezzatura manuale (sopra).

Tabella 3.4. Programma di diserbo nella semina in acqua

	Data	Fase fenologica	Erbicida	Principio attivo	Dose *kg o l ha^{-1}*
2011	23/5	Pre-semina	Ronstar FL	Oxiadiazon 380 g kg^{-1}	0,8
	20/6	Inizio accestimento	Clincher	Cyhalofop-butyl 20.92%	1,5
	21/6	Inizio accestimento	Stam Star Novel Flow	Propanil 41.4%	1,0
			Tripion E	MCPA 15 %	0,8
2012	8/5	Pre-semina	Hopper	Gliphosate 360 g l^{-1}	3,5
	24/5	Pre-semina	Ronstar FL	Oxiadiazon 380 g kg^{-1}	0,8
	12/6	Inizio accestimento	Clincher	Cyhalofop-butyl 20.92%	1,5
	18/6	Inizio accestimento	Stam Star Novel Flow	Propanil 41.4%	1,0
			Tripion E	MCPA 15 %	0,8

Tabella 3.5. Programma di diserbo nelle semine interrate

	Data	Fase fenologica	Erbicida	Principio attivo	Dose *kg o l ha^{-1}*
2011	17/5	Pre-emergenza	Ronstar FL	Oxiadiazon 380 g kg^{-1}	1,0
	20/6	Inizio accestimento	Clincher	Cyhalofop-butyl 20.92%	1,5
	21/6	Inizio accestimento	Stam Star Novel Flow	Propanil 41.4%	1,0
			Tripion E	MCPA 15 %	0,8
2012	8/5	Pre-semina	Hopper	Gliphosate 360 g l^{-1}	3,5
	15/5	Pre-emergenza	Ronstar FL	Oxiadiazon 380 g kg^{-1}	0,8
			Stomp aqua	Pendimethalin 455 g l^{-1}	1,5
	12/6	Inizio accestimento	Clincher	Cyhalofop-butyl 20.92%	1,5
	18/6	Inizio accestimento	Stam Star Novel Flow	Propanil 41.4%	1,0
			Tripion E	MCPA 15 %	0,8

Per quanto riguarda i trattamenti fungicidi, le applicazioni sono state differenziate sia nell'ambito delle gestioni irrigue sia nelle due stagioni considerate, in relazione alla presenza della malattia (Tabella 3.6). Infatti, è sempre stato previsto un intervento in botticella, con lo scopo di garantire la protezione dagli attacchi precoci al "colletto", mentre, a seconda della comparsa dei sintomi, sono stati programmati trattamenti specifici per il "Brusone fogliare".

Tabella 3.6. Programma di interventi fungicidi nelle tre tecniche di gestione dell'acqua

			Fungicida	Principio attivo	Dose *kg o l ha^{-1}*
FLD	2011	8/8	Amistar	Azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
	2012	31/7	Amistar	Azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
		9/8	Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
DRY	2011	8/8	Amistar	Azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
	2012	16/8	Amistar	Azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
		31/7	Amistar	Azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
		9/8	Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
IRR	2011	7/7	Amistar	azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
		20/7	Beam	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
		8/8	Amistar	azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
	2012	31/7	Amistar	azoxystrobin 250 g l^{-1}	1,0
			Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3
		9/8	Beam 12	Tryciclazolo 750 g kg^{-1}	0,3

Le operazioni di raccolta

Per stabilire il momento opportuno per la raccolta (Tabella 3.7) si è verificato il grado di maturazione delle spighette ed il loro contenuto di umidità. Mediamente, si è proceduto al raggiungimento di valori di umidità pari al 21%, tranne nei casi in cui era presente una grande variabilità nel grado di maturazione tra l'apice e la base della pannocchia. In questi casi, si è preferito intervenire con contenuti di umidità leggermente superiori, onde evitare riduzioni nella resa in grani interi.

La trebbiatura è avvenuta con mietitrebbiatrice parcellare tipo Iseki, avendo cura di raccogliere solo la parte centrale delle parcelle. Il risone raccolto è quindi stato sottoposto immediatamente all'essiccazione per portare l'umidità in un intervallo compreso tra 11 e 13 % (Figura 3.16).

Per quel che concerne le date di maturazione, nel 2011 solo Selenio si è distinto dalle restanti varietà. Nel 2012, invece, si sono evidenziate delle differenze tra i sistemi di coltivazione e nell'ambito dei trattamenti di concimazione.

Tabella 3.7. Date di raccolta anni 2011 e 2012

		Gladio		Baldo		Selenio		Loto	
		+ N	0 N	+ N	0 N	+ N	0 N	+ N	0 N
2011	FLD	30/9		30/9		6/10		10/9	
	DRY	30/9		30/9		6/10		10/9	
	IRR	30/9		30/9		6/10		10/9	
2012	FLD	28/9		10/10		17/10	10/10	1/10	
	DRY	28/9		10/10		17/10	10/10	5/10	
	IRR	1/10		10/10		17/10	10/10	1/10	

Figura 3.16. Raccolta (sopra, mietitrebbiatrice parcellare tipo Iseki)

3.2.1.2 I rilievi sperimentali

Produzione e fattori della produzione

Il quantitativo di risone raccolto (Figura 3.17), dopo essiccazione, è stato lasciato per un periodo di circa 30 giorni in magazzino al fine di raggiungere un equilibrio nel contenuto di umidità all'interno della cariosside. Successivamente, il prodotto è stato pesato ed è stata valutata con esattezza l'umidità finale. I risultati sono stati espressi al 14% di umidità.

Contemporaneamente è stato prelevato il campione per la determinazione del peso dei 1000 semi (eseguito su due ripetizioni per parcella) e per le analisi qualitative.

Per quanto riguarda l'investimento della coltura, il numero di culmi per unità di superficie è stato quantificato prima dell'inizio della fase di accestimento (investimento iniziale) ed i pre-raccolta (investimento finale), mediando le misurazioni effettuate su 3 ripetizioni da 0,25 m^2 a parcella.

Infine, su un campione di 20 pannocchie per parcella sono state conteggiate le spighette piene e quelle sterili.

Figura 3.17. Raccolta dei paglioni

Qualità merceologica

Il risone campionato ad un mese dall'essiccazione (Figura 3.18) è stato sottoposto alla valutazione della resa merceologica e dei difetti denominati gessato e danneggiato. Oltre all'importanza nel determinare il valore commerciale delle produzioni, tali indici sono strettamente riconducibili ad aspetti nutrizionali e fisiologici avvenuti nel corso del ciclo colturale. I granelli gessati indicano spighette immature, presenti in colture molto lussureggianti, con accestimenti tardivi o in situazioni con irregolarità di maturazione nell'ambito della medesima pannocchia. I granelli danneggiati, invece, sono quelli che hanno subito attacchi di miridi o pentatomidi, la cui azione è facilitata dalla presenza di soluzioni di continuità nelle glumelle. La saldatura delle glumelle è anch'essa relazionabile allo stato nutrizionale della coltura, ai rapporti tra silicio ed azoto all'interno della pianta, agli stress termici nel periodo successivo alla fioritura.

La determinazione della resa globale e della resa in grani interi è stata ottenuta con l'ausilio di un sbramino e di una sbiancatrice modello Satake, avendo cura di mantenere il grado di lavorazione nel range 11,25 - 12,75%. Le rotture sono state separate per mezzo di separatori ad alveoli, della dimensione idonea alla varietà trattata (Figura 3.19).

Figura 3.18. Essicatoio parcellare

Figura 3.19. Sbiancatrice Satake (sopra) e difetti riscontrati nella granella (a destra)

Flora infestante

Le specie infestanti sono state quantificate nelle due aree testimone per ogni camera, attraverso un rilievo di metà luglio. Anche in questo caso le misurazioni sono state effettuate su 3 ripetizioni da 0,25 m^2 a parcella.

Piriculariosi e presenza di Lissorpthrous oryzophilus

La pressione della più temibile malattia fungina del riso, è stata valutata osservando le lesioni al collo paniculare in pre-raccolta. I risultati sono stati espressi seguendo le indicazioni del manuale dell'IRRI (IRRI, 2002), che prevede una scala di incidenza percentuale nel range 0 = nessun sintomo – 9 = più del 50 % dei culmi colpiti.

Per il monitoraggio delle larve del Punteruolo acquatico del riso (*L. oryzophilus*), è stato utilizzato il metodo del carotaggio. L'operazione ha avuto lo scopo di individuare e conteggiare le larve tra le radici del riso ed è stata eseguita con un carotatore metallico con cilindro da 10 cm di diametro e 10 cm di altezza a fine giugno. Il campione così ottenuto è stato lavato in acqua per consentire il distacco delle larve dal terreno e la loro successiva identificazione per affioramento.

Efficienza d'uso dell'azoto

La quantità di azoto assorbito dalla pianta derivante dal fertilizzante è stata calcolata utilizzando il metodo per differenza tra azoto assorbito da una parcella fertilizzata meno l'azoto assorbito da una parcella testimone, non fertilizzata. A tal fine, è stato necessario quantificare il contenuto del nutriente nel risone e nella paglia attraverso l'analizzatore Kjeldahl.

Monitoraggio sul contenuto di azoto nelle acque superficiali e profonde e sugli andamenti del pH e del potenziale di ossido-riduzione del suolo

Il monitoraggio sul contenuto di azoto nelle acque superficiali è stato condotto in entrambe le stagioni colturali campionando le acque in entrata ed in uscita dalle camere con frequenza settimanale e, comunque, in tutti i casi in cui è stata praticata un'asciutta. In tali circostanze, è stato ritenuto necessario prelevare le acque in tre momenti della fase di asciutta: ad inizio, nel momento di maggior flusso ed alla fine, quando ormai circolava solo l'acqua rimasta nei solchi. I dati di concentrazione sono stati riportati come media delle tre misurazioni.

Per valutare l'entità della percolazione di azoto nelle acque profonde, sono state installate due batterie da tre coppe porose per ogni camera, posizionate a 25, 50 e 75 cm di profondità (Figura 3.20). Anche in questo caso i campionamenti hanno avuto una frequenza settimanale. Sia per le acque superficiali e sia per quelle profonde

sono state determinate le concentrazioni di azoto nitrico ($N\text{-}NO_3$) e di quello ammoniacale ($N\text{-}NH_4$) con metodo IRSA (1994).

Nel 2012 tutte le camere sono state dotate di elettrodi a pH e Red-Ox. Le letture sono state cadenzate settimanalmente, ad eccezione della conduzione ad irrigazioni turnate, per cui si sono rese necessarie verifiche supplementari.

Figure 3.20. Batterie di coppe porose in ceramica poste nelle diverse camere (a sinistra) e campionamento delle acque dei piezometri (a destra)

Analisi statistica

Tutti i risultati sono stati sottoposti all'analisi della varianza, confrontando le medie con LSD test (P=0,01).

3.2.2 Indagini idrologiche e idrauliche a scala parcellare

Le indagini idrologiche e idrauliche a scala parcellare si sono articolate in tre tipologie di attività: monitoraggio in continuo dei flussi idrici e dello stato dell'acqua nel suolo; elaborazione dei dati osservativi per il computo del bilancio idrologico e degli indici di efficienza di uso dell'acqua per i tre diversi sistemi di coltivazione analizzati; sviluppo di modelli matematici del sistema suolo-coltura per l'interpretazione e la generalizzazione dei rilievi sperimentali. Le attività di ricerca svolte e la loro relazione con le indagini idrologiche e idrauliche a scala di distretto, sono illustrate nella Figura 3.21.

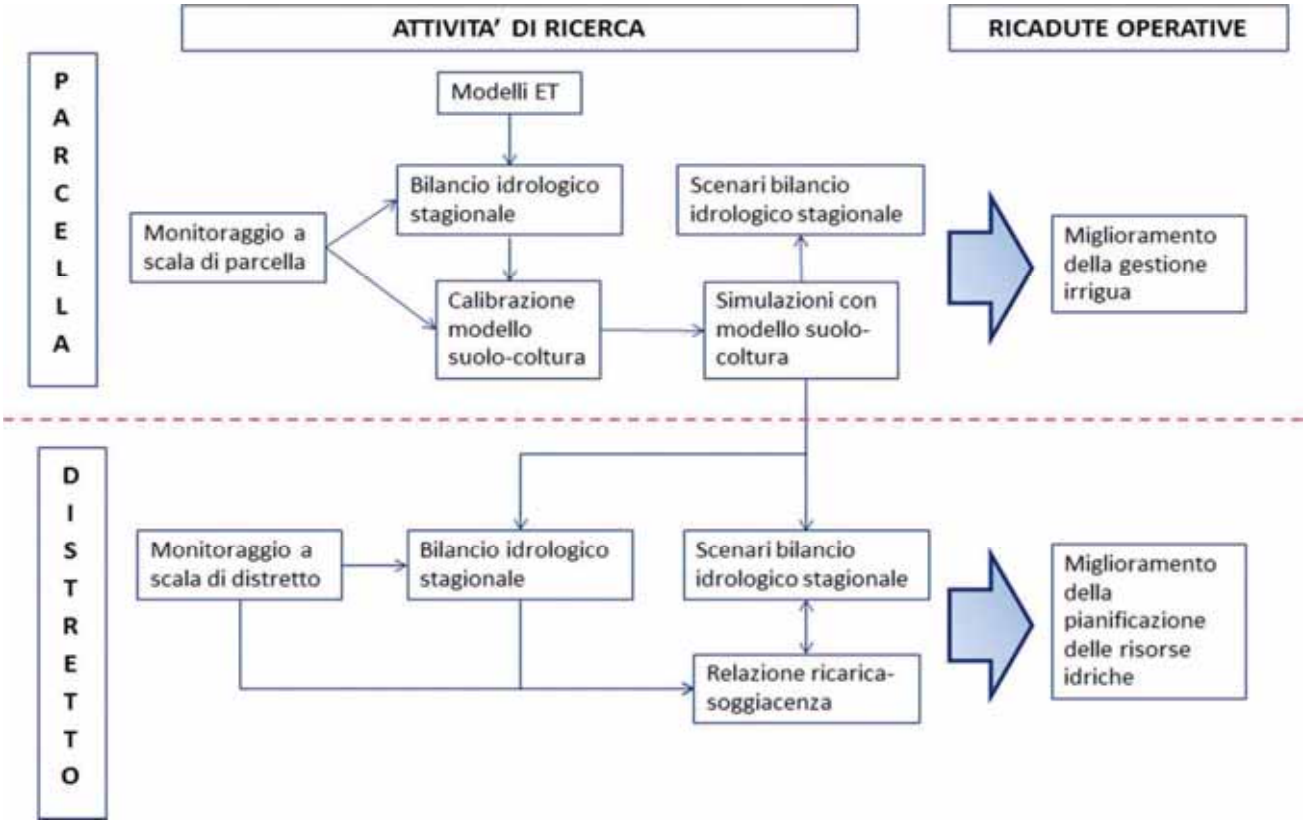


Figura 3.21. Indagini idrologiche e idrauliche a scala di parcella agraria e di distretto irriguo

3.2.2.1 Monitoraggio idrologico e idraulico

La misura degli invasi e dei flussi di acqua a scala parcellare è tutt'altro che agevole sia per l'ampia gamma di tipologie di grandezza da misurare (dalle portate irrigue in ingresso e in uscita, al contenuto idrico del suolo, ai flussi di evaporazione e traspirazione), sia delle difficoltà pratiche nello svolgimento delle misure (si pensi ad esempio alla misura del contenuto e del potenziale idrico negli strati profondi del suolo, o delle portare in uscita dalle camere di risaia).

E' stato progettato, realizzato e sperimentato un sistema innovativo di monitoraggio integrato dei flussi e degli invasi idrici in appezzamenti coltivati. Il sistema è caratterizzato, oltre che dalla varietà di sensori utilizzati, dalla loro interconnessione in una rete locale con trasmissione wireless di tutte le misure a un nodo di prossimità, accessibile via internet da remoto per la verifica delle misure in tempo reale e per l'accesso alle serie storiche.

Il sistema, le cui caratteristiche sono descritte nel seguito, è stato installato nella stagione agraria 2012 e nuovamente in quella 2013 in tre degli appezzamenti del sito sperimentale ENR di Castello D'Agogna, uno per ognuno dei metodi di gestione irrigua DRY, FLD e IRR (T1b, T2a e T3a nella Figura 3.2), con l'obiettivo di monitorare al meglio delle possibilità tecniche i flussi idrici in ingresso ed in uscita dalle parcelle ed alcune variabili di stato, quali il contenuto idrico del suolo nelle camere non in sommersione, la soggiacenza della falda freatica e l'altezza del battente idrico nel caso delle camere in sommersione. In particolare, la sperimentazione per il 2013 è stata condotta nell'ambito del progetto PRIN 2010-2011, dal titolo: "I paesaggi tradizionali dell'agricoltura italiana: definizione di un modello interpretativo multidisciplinare e multiscala finalizzato alla pianificazione e alla gestione".

L'installazione sperimentale e le misure all'ENR di Castello D'Agogna

Lo schema generale dell'impianto di misura e acquisizione dati è simile per le tre camere caratterizzate da diverse gestioni irrigue, discostandosi solamente per i sensori di umidità, non presenti nel caso della sommersione, e per la stazione eddy covariance per la misura l'evapotraspirazione effettiva delle colture, installata tra le camere con gestione irrigua a sommersione continua e riso aerobico (Figura 3.22).

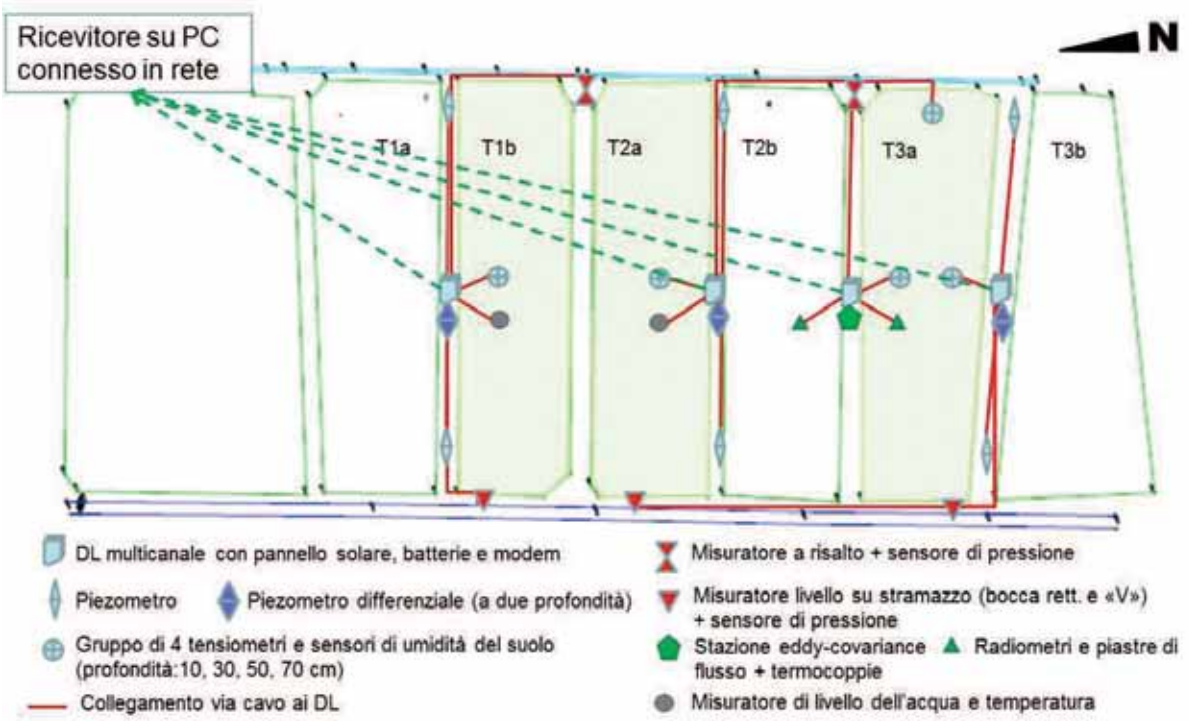


Figura 3.22. Disegno sperimentale e strumenti installati

Portate in ingresso e uscita dalle parcelle. All'ingresso di ciascuna camera monitorata si è installato un misuratore a risalto, realizzato presso le officine del DiSAA. Nel 2012 all'uscita di ogni camera monitorata si sono installati misuratori a stramazzo (con luce intercambiabile - rettangolare e di tipo "V" - modificata a seconda dell'entità delle portate transitanti) e misuratori a risalto a lettura manuale per intercettare e misurare le ultime portate derivanti dallo scolo delle camere. Nel 2013 i misuratori a stramazzo per la misura delle portate in uscita sono stati sostituiti con misuratori a risalto analoghi a quelli utilizzati per la misura delle portate in ingresso, in modo da misurare, con una unica tipologia di strumenti sia i flussi in entrata che le uscite. Grazie all'utilizzo di appositi sensori per la misura dei carichi idraulici nei misuratori (trasduttori di pressione collocati in pozzetti di calma), da cui si deriva la portata fluente, si sono resi disponibili l'andamento delle portate per intervalli di tempo di 10 minuti, in modo da cogliere variazioni anche minime dei flussi idrici.

Figura 3.23. Particolari dei misuratori a risalto, a stramazzo e dell'esecuzione di campagne di misura della portata in uscita per verificare le scale delle portate teoriche

Soggiacenza della falda. Lungo gli argini si sono inoltre installati 9 pozzetti piezometrici realizzati con tubi in PVC fenestrati. I pozzetti sono dotati di trasduttori di pressione per la misura in continuo dell'altezza della falda freatica al di sotto del piano campagna.

Livello dell'acqua (parcelle in sommersione). Nelle parcelle con gestione irrigua a sommersione (T1b e T2a), si è provveduto al monitoraggio con passo orario del livello idrico e della temperatura dell'acqua, tramite trasduttori di pressione.

Contenuto e potenziale idrico nel suolo. In tutte le camere si sono installati gruppi di quattro tensiometri (Irrometer, USA) posti a differente profondità (10, 30, 50, 70 cm) dotati di trasduttore di pressione per la misura in continuo del potenziale idrico del suolo. Aggiuntivamente, nelle camere non sommerse si è installata una sonda caratterizzata da quattro sensori di umidità collocati alle medesime profondità dei tensiometri (EnviroSCAN, Sentek, Australia). In particolare, nella parcella con riso aerobico si sono installati in totale tre gruppi di tensiometri e sonde di umidità, con l'obiettivo di monitorare lo stato idrico del suolo per le tre tipologie principali di suolo (LF, C-LA e S) evidenziate dallo studio pedologico (Figura 3.12). Nella camera con semina interrata e sommersione in 3°- 4° foglia, la sonda di umidità è stata installata accanto ai tensiometri (suolo C-LA) dopo la semina, rimossa dopo la sommersione e reinstallata prima dell'asciutta finale.

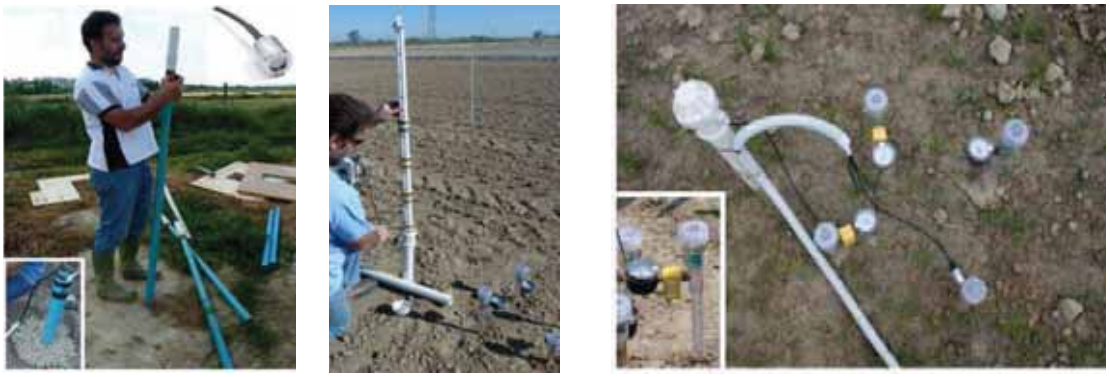


Figura 3.24. Particolari dell'installazione dei pozzetti piezometrici con i relativi trasduttori di pressione, delle sonde di umidità e dei tensiometri idraulici

Flussi di evapotraspirazione. Si è infine installata una stazione eddy-covariance per la misura in automatico dei flussi gassosi (H_2O, CO_2) sull'argine che separa le parcelle con riso in asciutta da quelle irrigate per sommersione tradizionale. La stazione comprende i seguenti strumenti: 1 gas-analyser (LI-7500, LICOR, USA), 1 anemometro sonico (RM-81000V, Young, USA), 2 radiometri netti, uno per trattamento irriguo (CNR-1, Kipp & Zonen, Olanda), 3 piastre per la misura del flusso di calore nel suolo (HFP01, Hukseflux, Olanda) installate nel suolo a 8 cm di profondità, 2 nella parcella con riso in asciutta e 1 nella parcella in sommersione, 6 termistori (ELSI, Italia) installati a coppie a differenti profondità al di sopra delle piastre di flusso. Gli strumenti per la misura del flusso di evapotraspirazione (gas-analyser e anemometro sonico) ed i radiometri netti si sono sempre mantenuti a circa 1 metro dalla sommità della vegetazione, regolandone progressivamente l'altezza nel corso della stagione.
Al fine di consentire l'utilizzo dei dati rilevati dalla stazione eddy-covariance per la calibrazione di modelli matematici per la stima dei flussi di evapotraspirazione, nel corso dei due anni di monitoraggio sono state inoltre condotte, per ognuna delle tre gestioni irrigue, periodiche campagne manuali di misura degli andamenti dell'indice di area fogliare (LAI) tramite ceptometro AccuPAR LP-80, dell'altezza della coltura e della profondità raggiunta dall'apparato radicale (11 campagne nel 2012 e 14 nel 2013).

Figura 3.25. Stazione eddy covariance, con in evidenza il gas-analyser, l'anemometro sonico, i due radiometri netti e, nel riquadro in basso a sinistra, l'installazione delle piastre di flusso e dei termistori

Sistema integrato di acquisizione e trasmissione delle misure. Tutti gli strumenti sono stati collegati a sistemi di acquisizione collocati in prossimità della mezzeria di ciascun argine attrezzato, costituiti da un gruppo di alimentazione (pannello fotovoltaico e batteria) e un data-logger collegato via wireless ad una stazione di connessione web collocata presso gli uffici ENR. In particolare, si sono installati 3 data-logger CR-1000 ed un CR-

5000 (Campbell Sci., USA), quest'ultimo dedicato alla stazione eddy-covariance. Il software di acquisizione utilizzato è LoggerNet (Campbell Sci., USA).

Figura 3.26. Particolari del collegamento via cavo di tutta la strumentazione ad un data-logger CR-1000 e del data logger CR-5000

Il protocollo di misura prevedeva che alle 8:00 di ogni giorno un file di back-up fosse spedito via FTP dal computer collocato presso gli uffici ENR ad una unità di stoccaggio dati presso il DiSAA. Al fine di facilitare il controllo in remoto delle serie temporali di dati acquisite, si è sviluppata un'interfaccia in Java supportata da SQLite che ne consente un'agevole visualizzazione. In Figura 3.27 si riportano alcune schermate dell'interfaccia che illustrano la lista delle variabili misurate, ognuna delle quali può essere selezionata per essere successivamente visualizzata in grafico, e l'esempio di un grafico che riporta l'andamento dei valori di temperatura e pressione acquisiti dal trasduttore di pressione in un pozzetto piezometrico della parcella T1. Ulteriori dettagli tecnici sull'installazione sperimentale e sul software sviluppato si possono trovare in Chiaradia et al. (2013).

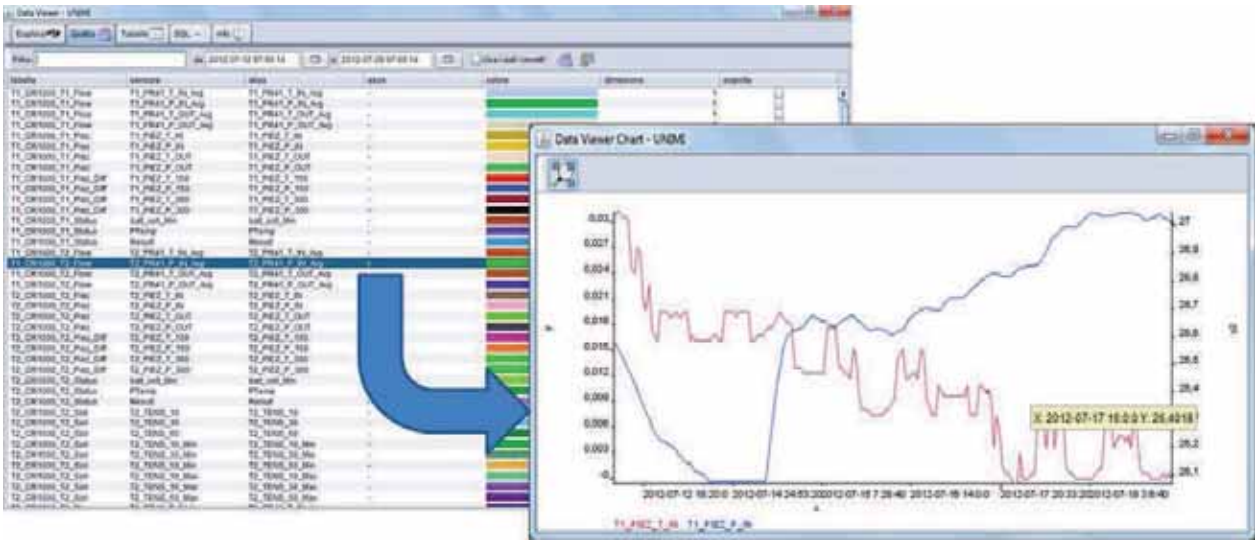


Figura 3.27. Particolari dell'interfaccia sviluppata per la visualizzazione e l'interrogazione dei dati acquisiti in campo

3.2.2.2 Bilancio idrologico e indici di efficienza di uso dell'acqua

La Figura 3.28 riassume i principali flussi e gli invasi di acqua che interessano il riso in sommersione ed il riso aerobico. In azzurro sono rappresentati i flussi sui quali si sono concentrate le attività di monitoraggio nel progetto, in blu quelli non misurati.

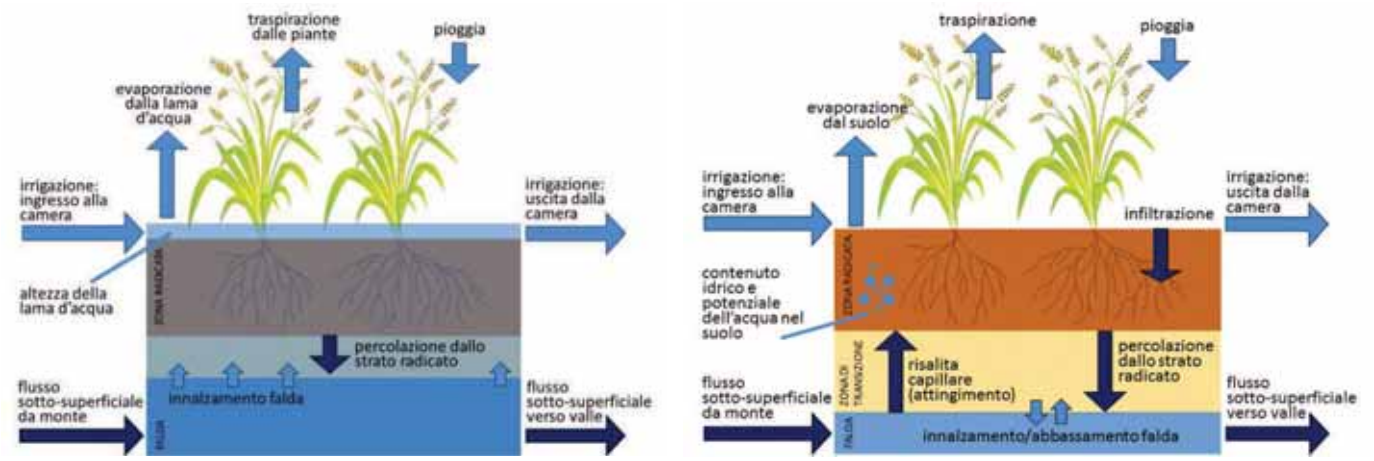


Figura 3.28. Flussi idrici e volumi di acqua immagazzinati in appezzamenti caratterizzati da riso in sommersione continua (a sinistra) e aerobico (a destra). In azzurro i principali processi sui quali si è concentrata l'attività di monitoraggio

I bilanci idrologici per le stagioni agrarie 2012 e 2013 sono stati calcolati, per ognuno dei tre sistemi di coltivazione, a partire dai flussi e dagli invasi di acqua monitorati in continuo, applicando la seguente equazione di bilancio idrologico al volume di controllo che si estende per ogni appezzamento dalla sommità delle colture al limite della zona di radicazione (40 cm):

$$(I_i - I_o) + P - (D - C) - ET - \Delta S = 0$$

dove I_i e I_o sono gli apporti irrigui in ingresso ed in uscita da ogni camera, P è la pioggia, D e C sono rispettivamente la percolazione e la risalita capillare al limite dello strato radicato, ET è l'evapotraspirazione dall'agroecosistema (composta da E_S, che costituisce l'evaporazione dal suolo sotto la coltura, E_{H20}, l'evaporazione dalla lama d'acqua nel caso di sommersione e T, la traspirazione dalla coltura), ΔS è la variazione della quantità d'acqua immagazzinata nell'appezzamento. Tutte le grandezze sono riferite all'intera stagione colturale, tra la data di semina (o di sommersione, nel caso del riso con semina in acqua) e la data di raccolta e sono state espresse sia in mm che in m^3.

I primi tre termini sono stati ottenuti direttamente dalle misure di portata e di pioggia.

Il termine di variazione di invaso, ΔS, si riferisce alla sola variazione di contenuto idrico nel suolo. La variazione nella quantità d'acqua stoccata al di sopra della superficie del suolo (battente idrico) nel caso di riso in sommersione è infatti nulla quando si considera il bilancio stagionale: questo perché l'istante iniziale considerato nel computo è relativo al giorno della sommersione in un momento precedente all'immissione dell'acqua nella parcella. Al fine di stimare il valore di tale variabile alla data di semina e di raccolta nel caso della parcella con riso aerobico, i dati monitorati per le tre tipologie di suolo presenti (LF, C-LA, S) sono stati pesati sulla base dell'area occupata nella parcella da ogni tipologia. Per le restanti due parcelle si sono utilizzati i dati relativi all'unico punto di misurazione disponibile in ognuna di esse.

Per quanto riguarda invece i termini di evaporazione e traspirazione, data la posizione della stazione eddy-covariance sull'argine tra i due trattamenti irrigui FLD (semina in acqua e sommersione continua) e DRY (semina interrata ed irrigazioni turnate), si sono compiute diverse elaborazioni per poter ottenere le serie giornaliere del flusso evapotraspirativo proveniente dalle tre parcelle. In primo luogo, è stata condotta per ogni passo temporale di acquisizione della stazione eddy-covariance (30 minuti) un'analisi di dettaglio per determinare la posizione e la dimensione dell'area al suolo che contribuiva al flusso misurato (tale area è chiamata *footprint*). Si sono dunque ottenuti due insiemi di dati semiorari di ET, ciascuno comprendente circa il 10-15% dei passi temporali della stagione agraria, i cui valori sono riferibili esclusivamente ad uno dei due trattamenti irrigui. Essi sono stati

utilizzati per calibrare tre modelli del tipo Penman-Monteith (si vedano, per approfondimenti su questo tipo di modelli: Gharsallah et al., 2013; Facchi et al., 2013a; Ortega-Farias et al., 2010): uno per la stima dell'evaporazione dalla lama d'acqua quando questa è presente (E_{H20}), uno per la stima dell'evaporazione dal suolo umido (E_s) e uno per la traspirazione della vegetazione (T). I modelli utilizzano gli andamenti nel tempo delle variabili agrometeorologiche e dei parametri biometrici della coltura misurati nel corso della stagione agraria. I due insiemi di misure eddy-covariance per i trattamenti FLD e DRY sono stati utilizzati per la calibrazione dei modelli, che sono stati quindi utilizzati per stimare i flussi giornalieri di evaporazione e traspirazione nell'equazione di bilancio per ognuno dei tre trattamenti.
Infine, il termine relativo alla percolazione al netto dell'apporto di risalita capillare, D-C, è stato calcolato come termine residuale dell'equazione del bilancio.
Dai valori assunti dai diversi termini del bilancio idrologico è immediato calcolare i valori degli indici di efficienza e di produttività dell'irrigazione comunemente utilizzati. L'efficienza irrigua (EA) in letteratura viene spesso calcolata come segue (Bouman et al., 2005):

$$\mathrm{EA} = \frac{\mathrm{ET}}{\mathrm{I_i} + \mathrm{P}}$$

Tuttavia, nei sistemi irrigui di Piemonte e Lombardia, il flusso irriguo in uscita dalle camere di risaia non può essere considerato una perdita, dal momento che viene utilizzato in larga misura per l'irrigazione di ulteriori campi posti idraulicamente a valle, e dunque l'indice di efficienza irrigua può essere così modificato:

$$\mathrm{EA}' = \frac{\mathrm{ET}}{\mathrm{I_i} + \mathrm{P} - \mathrm{I_o}}$$

Il riutilizzo di I_o negli appezzamenti situati più a valle non è del 100%, dunque l'efficienza effettiva avrà un valore intermedio tra i due, ma verosimilmente più prossimo a EA'.
E' inoltre interessante quantificare il rapporto tra la produzione di risone e il volume di acqua necessario per ottenerla. L'indice di produttività dell'acqua (PA, kg m^{-3}) è così definito (Bouman et al. 2005):

$$\mathrm{PA} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{V_i} + \mathrm{P}}$$

dove Q è la produzione di risone in kg.
Quando PA viene modificato per prendere in considerazione i recuperi idrici ad una scala spaziale più ampia, diventa (Dunn e Gaydon, 2011):

$$\mathrm{PA}' = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{V_i} + \mathrm{P} - \mathrm{V_o}}$$

Per le due annate si sono considerate le date di semina e maturità fisiologica del riso Gladio, essendo questa la varietà dominante nelle camere (Tabella 3.8). Il ritardo nelle operazioni di semina nel secondo anno di sperimentazione è stato causato dalle intense piogge che hanno caratterizzato il maggio 2013.
I risultati delle elaborazioni sono presentati nel Par. 4.2.2.

Tabella 3.8. Date significative nella gestione dei tre sistemi colturali: semina in sommersione (FLD), semina interrata e sommersione ritardata (DRY), semina interrata e irrigazione intermittente (IRR)

	FLD		DRY		IRR	
Anno di sperimentazione	2012	2013	2012	2013	2012	2013
Semina interrata IRR e DRY			15/05	28/05	15/05	28/05
Sommersione FLD	25/05	06/06	19/06	20/06		
Semina in acqua FLD	28/05	07/06				
Maturità fisiologica	21/09	14/10	21/09	14/10	21/09	14/10
Durata del ciclo colturale	120	131	130	140	130	140

3.2.2.3 Modellistica idrologica del sistema suolo-coltura

Obiettivo di questa attività è quello di mettere a punto modelli matematici di simulazione del sistema suolo-coltura per interpretare e generalizzare i dati osservativi rilevati nel sito sperimentale di Castello d'Agogna e per estendere le stime dei flussi idrici a condizioni ambientali diverse da quelle sperimentali, ai fini delle indagini a scala distrettuale, descritte nel successivo Par. 3.2.3. L'attività si è quindi articolata in tre fasi: messa a punto di un modello idrologico di simulazione della dinamica dell'acqua nel sistema suolo-vegetazione per la parcella con riso aerobico sulla base dei dati rilevati nella sperimentazione a Castello d'Agogna, parametrizzazione di un analogo modello con tutte le combinazioni suolo-coltura riscontrate nel il distretto di S. Giorgio di Lomellina, utilizzo dei modelli (a cui si aggiunge un modello semplice per la stima dei termini del bilancio idrologico al campo nel caso di riso in sommersione) per la valutazione degli effetti di variazioni della soggiacenza di falda per le colture e i suoli di Castello d'Agogna e del distretto di S. Giorgio.

Il modello SWAP

Il modello utilizzato è SWAP (Soil Water Atmosphere Plant model; Kroes e Van Dam, 2003). Tra i modelli numerici che risolvono l'equazione di Richards nella forma mono-dimensionale verticale, SWAP è tra i più diffusamente applicati e meglio documentati. Nel modello SWAP lo studio dell'insieme suolo saturo – suolo insaturo – pianta - atmosfera viene sviluppato con riferimento ad un unico sistema continuo, in cui l'acqua si muove con flussi diretti verso il basso o verso l'alto per effetto dei gradienti di potenziale.

Le caratteristiche idrauliche del suolo, rappresentate dalle curve di ritenzione e di conducibilità idraulica insatura, vengono descritte in SWAP rispettivamente tramite le equazioni analitiche di Van Genuchten (1980) e Mualem (1976) delle quali devono essere forniti i parametri.

Per quanto riguarda lo sviluppo della coltura, SWAP contiene moduli di diversa complessità per la sua descrizione: in particolare un modello di simulazione dettagliato (WOFOST 6.0; Spitters et al. 1989, Hijmans et al. 1994) e un modulo semplice che si limita a considerare in ingresso i dati osservativi. Il modulo di crescita semplice, utilizzato nelle simulazioni, richiede l'andamento in funzione dello stadio di sviluppo fenologico di: *LAI* (*Leaf Area Index*) o *CF* (*soil Cover Fraction*) (-), altezza colturale h_c (cm), profondità delle radici D_r (cm) e loro distribuzione.

Una volta definito il sistema attraverso i suddetti parametri, al fine di effettuare le simulazioni devono essere forniti al modello i dati agrometeorologici ed irrigui relativi al periodo da simulare, la condizione al contorno inferiore del volume di suolo preso in esame (ossia la presenza o meno di una falda e l'andamento del suo livello nel tempo) e, infine, la condizione iniziale (ossia le informazioni relative allo stato idrico del suolo all'inizio della simulazione).

Calibrazione del modello SWAP nel caso del riso aerobico a Castello D'Agogna

Il modello è stato implementato per la parcella sperimentale caratterizzata da riso in condizioni di aerobiosi per la stagione agraria 2012 utilizzando i dati orari relativi a radiazione solare (kJ m^{-2}), temperatura minima e massima dell'aria (°C), umidità media dell'aria (kPa), velocità del vento (m s^{-1}) e pioggia (mm) misurati dalla centralina della rete meteorologica ARPA-Lombardia situata nella sede di Castello D'Agogna dell'ENR. Per quanto riguarda i

parametri della coltura, si è utilizzato il modulo semplice di crescita colturale implementato in SWAP. Le date di semina e di raccolta, così come gli andamenti giornalieri di indice di area fogliare LAI (m^2 m^{-2}), di altezza colturale h_c (m) e di profondità raggiunta dall'apparato radicato D_r (m) sono desunti dai dati osservativi collezionati nel 2012 nel campo sperimentale ENR coltivato con riso in condizioni aerobiche. Si sono inoltre utilizzati i dati relativi agli apporti irrigui, al contenuto idrico del suolo e alla soggiacenza di falda misurati nello stesso campo sperimentale in tale annata (si veda il Par. 4.2.1 per una descrizione di alcuni dei dati sperimentali misurati).
Per quanto riguarda il suolo del sito sperimentale, è stato suddiviso in 6 orizzonti secondo le indicazioni ottenute dal rilievo pedologico. SWAP richiede la descrizione di ciascun orizzonte attraverso i 4 parametri della funzione di ritenzione di Van Genuchten (1980) e la corrispondente funzione di conducibilità di Mualem (1976), per un totale di 36 parametri. Alcune informazioni di base sono state desunte dai dati di campo (ad esempio, i valori del contenuto idrico a saturazione Θ_{sat}), e dalle funzioni di pedo-trasferimento Rosetta (Schaap et al., 2001). Nondimeno, per ottenere concordanza tra i dati sperimentali e le stime fornite dalla simulazione con SWAP, è stato indispensabile procedere alla calibrazione di alcuni parametri. Per fare questo si è applicato SCEM-UA (Vrugt et al., 2003), uno dei più potenti e versatili algoritmi di ottimizzazione globale ad oggi disponibili. SCEM-UA, interfacciato con SWAP tramite script MATLAB scritti ad hoc, ha lanciato 10.000-40.000 simulazioni del modello modificando ogni volta il valore dei parametri per identificare i valori che più riducevano le distanze tra i valori di umidità del suolo misurati e quelli simulati per gli stessi istanti temporali alle medesime profondità. L'andamento giornaliero del contenuto idrico del suolo, dell'evapotraspirazione e del flusso al limite della zona radicata simulati dal modello calibrato per la stagione agraria 2012 sono illustrati nel Par. 4.2.2.

Simulazione degli effetti di variazioni della soggiacenza di falda, delle caratteristiche del suolo e della coltura
SWAP è stato utilizzato per estendere ad altri anni, a diverse condizioni idrologiche e pedologiche, e al caso di diversi usi del suolo (mais da granella) la simulazione condotta per l'anno 2012 nell'appezzamento sperimentale dell'ENR a Castello D'Agogna coltivato con riso aerobico. Per quanto riguarda il riso in sommersione, coltura dominante nel distretto S. Giorgio di Lomellina, si è invece utilizzato un approccio semplificato per stimare i termini del bilancio idrologico nei territori ove è presente.
In particolare, le condizioni considerate nello svolgimento delle diverse simulazioni sono le seguenti:
Dati meteorologici. Si sono considerati i dati orari misurati dalla centralina ARPA situata presso l'ENR per il periodo 2008-2013 e per l'anno 2003 (quest'ultimo considerato un anno estremo). Laddove le serie acquisite presentavano dati assenti sono state integrate con stime elaborate a partire dai dati registrati in stazioni limitrofe ARPA (Landriano e S. Angelo Lodigiano) con regressione lineare multipla.
Soggiacenza della falda. Sono state effettate simulazioni considerando sei differenti profondità della falda freatica dal piano campagna. In particolare, si sono considerate le seguenti soggiacenze: -0.5, 0.75, -1, -1.5,-2 m e, infine, una superficie di falda ad una profondità tale da garantire un'assenza di fenomeni di risalita capillare (condizione di "drenaggio libero").
Parametri della coltura. Per il riso, sia in sommersione con semina in acqua (FLD) che aerobico (IRR), le date di semina e di raccolta, così come gli andamenti giornalieri dei parametri biometrici (LAI, altezza colturale e profondità di radicazione) nelle diverse annate sono stati identificati riscalando i dati misurati nel 2012 e 2013 nel campo sperimentale attraverso un modello che considera la somma termica necessaria per la semina e per il raggiungimento di ogni fase fenologica nei diversi anni, nell'ipotesi che la coltura cresca in condizioni ottimali (Gandolfi et al., 2010; Stockle and Nelson, 1996). Si è scelto per le simulazioni un riso a ciclo medio-lungo (150 giorni), dunque diverso dal Gladio seminato a Castello D'Agogna, poiché fosse maggiormente rappresentativo della situazione nel bacino risicolo piemontese e lombardo.
Per il mais da granella, l'andamento giornaliero dei parametri colturali è stato riprodotto utilizzando lo stesso modello basato sul metodo dei gradi giorno, ma a partire da dati misurati disponibili in letteratura per il mais della pianura lombarda (Baroni et al., 2010; Facchi et al., 2013b).

Parametri del suolo. Oltre a quelli individuati per la simulazione relativa all'anno 2012, riportati in Tabella 4.16, sono stati considerati quelli caratteristici delle due principali tipologie di suolo presenti nel distretto irriguo S. Giorgio Lomellina (ERSAL, 1993): ad ovest del torrente Erbognone il suolo è franco, ben strutturato con buona capacità ritentiva (suolo "ovest" nel seguito); ad est presenta tessitura principalmente sabbiosa caratterizzata da permeabilità più elevate (suolo "ovest" nel seguito). I parametri idraulici per le due tipologie di suolo sono stati calcolati utilizzando le funzioni di pedotrasferimento (PTF) ROSETTA (Schaap et al., 2001).
Interventi irrigui. Si sono ipotizzati due diversi scenari di gestione irrigua. Il primo è caratterizzato da interventi irrigui di 50 mm a domanda, ossia ogni qualvolta l'umidità del suolo si trova in prossimità della soglia critica al di sotto della quale la traspirazione si riduce al di sotto del valore potenziale (ossia T_{eff}/T_{pot} dev'essere sempre prossimo all'unità). Interventi irrigui di 50 mm sono spesso suggeriti in letteratura nel caso di coltivazione del riso in condizioni aerobiche (ad esempio: Bouman et al., 2005). Con questa gestione, lo stress evapotraspirativo è sempre nullo e l'irrigazione simulata assume il significato del fabbisogno irriguo del riso aerobico con una gestione a domanda ottimale in diverse situazioni di soggiacenza della falda freatica. Il secondo scenario riproduce la gestione turnata dell'acqua che caratterizza le colture irrigate per scorrimento in questa porzione del Comprensorio di Irrigazione e Bonifica Est-Sesia, e prevede un turno di 15 giorni (che si riduce a 7 per il riso aerobico nel caso di suoli da franchi a grossolani) ed una somministrazione di 120 mm. Questo secondo scenario permette di verificare i consumi idrici e lo stress evapotraspirativo del riso aerobico nel caso in cui la sua gestione irrigua fosse uniformata a quella delle altre colture irrigue nell'area di indagine.

In definitiva, le combinazioni suolo-coltura per le quali sono state effettuate le simulazioni sono:

- suolo "Mortara" + riso in asciutta;
- suolo "ovest S. Giorgio" + riso in sommersione;
- suolo "ovest S. Giorgio" + riso in asciutta;
- suolo "ovest S. Giorgio" + mais da granella;
- suolo "ovest S. Giorgio" + coltura non irrigua;
- suolo "est S. Giorgio" + riso in sommersione;
- suolo "est S. Giorgio" + riso in asciutta;
- suolo "est S. Giorgio" + mais da granella;
- suolo "est S. Giorgio" + coltura non irrigua;

Come già accennato, per il riso in sommersione con semina in acqua (FLD) coltivato su entrambe le tipologie di suolo nel distretto S. Giorgio di Lomellina, si è utilizzato un approccio modellistico semplificato per la stima del fabbisogno irriguo al campo e delle perdite per percolazione. Si è dapprima calcolato il fabbisogno irriguo colturale in condizioni idriche ottimali ET_c moltiplicando il coefficiente colturale K_c del riso (ottenuto dalla sperimentazione descritta nel Par. 3.2.2.1 e illustrato nella Figura 4.20) per il potere evapotraspirante dell'atmosfera ET_0. Il fabbisogno irriguo al campo si è poi ottenuto sottraendo, a passo giornaliero, le eventuali precipitazioni da ET_c e infine dividendo il valore ottenuto per l'efficienza del metodo irriguo. Dal valore selezionato per l'efficienza conseguono dunque le perdite per percolazione.
Per le restanti unità suolo-coltura, il fabbisogno irriguo al campo e la percolazione si sono ottenuti da simulazioni effettuate con SWAP.

3.2.3 Indagini idrologiche e idrauliche a scala distrettuale

Le attività di ricerca condotte alla scala di distretto irriguo e la loro relazione con quelle a scala di parcella agraria sono illustrate in Figura 3.21. Anche alla scala distrettuale si sono in prima battuta analizzate le diverse componenti del bilancio idrologico, al fine di verificare le ipotesi di distretto "idrologicamente ben delimitato" e la congruità dei dati monitorati disponibili. Questa operazione si è in particolare condotta per gli anni 2010 e 2011, per i quali si avevano a disposizione contemporaneamente i dati relativi alle portate idrologiche in ingresso al

distretto, i dati agrometeorologici necessari alla determinazione della pioggia e alle simulazioni con i modelli idrologici suolo-coltura descritti nel Par. 3.2.2.3 e i dati di soggiacenza della falda freatica. Secondariamente, per un periodo di tempo più lungo (2003 e 2008-2013), si sono utilizzati i dati monitorati disponibili ed i modelli suolo-coltura sviluppati per valutare l'effetto sui fabbisogni irrigui territoriali, sulla ricarica alla falda freatica e sulla soggiacenza di quest'ultima dal piano campagna di uno scenario di cambio di uso del suolo che prevede la conversione del sistema di coltivazione del riso dalla sommersione al riso aerobico. Alle indagini a scala di distretto hanno contribuito le attività del progetto PRIN 2010-2011, dal titolo: "I paesaggi tradizionali dell'agricoltura italiana: definizione di un modello interpretativo multidisciplinare e multiscala finalizzato alla pianificazione e alla gestione".

3.2.3.1 Monitoraggio idrologico e idraulico

L'attività di ricerca ha riguardato in prima battuta l'acquisizione delle informazioni disponibili circa gli apporti irrigui all'interno del distretto (Par. 3.1.3.1) per alcune annate significative. Tali dati sono disponibili presso il Consorzio Est Sesia (sede di Mortara) su supporto cartaceo fino all'anno 2010, quindi su supporto digitale. Sempre presso il Consorzio sono disponibili in formato digitale le soggiacenze di alcuni pozzi freatici posti in prossimità dell'area di studio (Figura 3.29). Come si può notare dalla figura, tra i pozzi monitorati dal Consorzio non c'è n'è uno che per sua posizione geografica possa essere considerato rappresentativo per la zona ovest del distretto. Il pozzo 055A si trova infatti ad ovest del torrente Agogna, e dunque all'esterno dell'area di studio. Questo fattore ha purtroppo costituto una limitazione da tenere in considerazione quando si analizzano i risultati delle elaborazioni compiute a partire dai dati sperimentali.

I parametri meteorologici sono stati ottenuti per gli anni di interesse (2008-2013 e 2003) dalla stazione meteorologica di Castello d'Agogna (ARPA Lombardia, Figura 3.3) mentre la distribuzione delle colture è stata ricavata dal SIARL per l'anno 2011.

codice	nome	da	a	% anno
051A	Candia Lomellina	02/01/2002	28/11/2011	30%
055A	Velezzo	02/01/2002	02/08/2011	30%
062A	Torre Beretti	02/01/2002	18/08/2011	30%
065B	San Giorgio	02/01/2002	28/01/2011	28%
072A	Ottobiano	02/01/2001	15/01/2011	28%
099A	San Martino Siccomaro	05/01/2000	12/07/2010	13%

Figura 3.29. Localizzazione dei pozzi monitorati dal Consorzio con particolare riferimento all'area del distretto di San Giorgio (individuata dal cerchio rosso nel mezzo)

3.2.3.2 Bilancio idrologico distrettuale

L'equazione di bilancio idrologico a scala distrettuale può essere formulata in assoluta analogia con quella definita per la scala di parcella agraria, ma i diversi termini assumono un significato differente in relazione alla scala spaziale di riferimento. In particolare, si considera un volume di controllo che include l'intero distretto e che si estende dalla sommità delle colture ad 1 metro di profondità nel suolo (al di sotto della zona di radicazione per le principali colture presenti). L'equazione generale è la seguente:

$$(I_i - I_o) + P - (D - C) - ET - \Delta S = 0$$

dove I_i sono gli ingressi attraverso la rete irrigua, I_o sono le uscite dal distretto attraverso i canali di scolo, P è la pioggia, D e C sono rispettivamente la percolazione e la risalita capillare al limite del volume di riferimento, ET è la componente dovuta ai processi di evaporazione e traspirazione dalle diverse superfici, ΔS è la variazione della quantità d'acqua immagazzinata nel sistema.

Più in dettaglio, il termine I_i è dato dalla somma dei volumi transitanti nei punti di misura lungo le rogge che servono il distretto. Il termine I_o invece considera le colature che sono quasi irrilevanti nel periodo estivo. P, considerata uniforme nel distretto, è ricavata dalle serie storiche registrate alla stazione agrometeorologica di Castello d'Agogna.

L'evapotraspirazione, ET, comprende in linea teorica sia l'evaporazione dal suolo (E_s) che dagli specchi d'acqua (campi allagati, E_{H20}, e canali, E_{H20-C}), sia la traspirazione dalla vegetazione (T). Il contributo al termine evaporativo imputabile alla superficie libera dei canali (E_{H2O-C}) può essere ritenuto trascurabile dato che l'estensione di questi ultimi è minima rispetto alla superficie a riso. L'evapotraspirazione dagli appezzamenti coltivati con riso con semina in acqua e sommersione continua, riso aerobico e mais da granella sono calcolati utilizzando i modelli idrologici suolo-coltura descritti nel Par. 3.2.2.3. I valori ottenuti dalle simulazioni possono poi essere riportati all'intero distretto considerando le superficie occupate dalle diverse colture.

Il termine D comprende sia per percolazione dagli appezzamenti coltivati (D_a), che quelli dalla rete irrigua (D_C) all'interno del distretto. Il termine C rappresenta la risalita capillare in ingresso al volume di controllo negli appezzamenti agrari. La differenza tra i termini D_a e C è in genere definita "percolazione netta" (N).

Il termine ΔS comprende sia la variazione di volume idrico immagazzinato al di sopra del piano campagna attraverso il processo di allagamento (e svuotamento) delle risaie (ΔS_{H2O}), sia il riempimento (e lo scarico) della rete di distribuzione (ΔS_{H2O-C}), sia la variazione di umidità del suolo nel volume di controllo (ΔU).

3.2.3.3 Elaborazione dei dati raccoli e modellistica

Analisi del bilancio idrologico a scala di distretto irriguo per gli anni 2010 e 2011

L'applicazione dell'equazione di bilancio appena descritta a due anni campione, il 2010 ed il 2011, ha consentito di effettuare considerazioni sulla affidabilità delle assunzioni fatte (in particolare quella di distretto irriguo "idrologicamente" delimitato), dei dati sperimentali disponibili nonché sull'ordine di grandezza che i termini del bilancio assumono nel caso del distretto San Giorgio di Lomellina. Si sono in particolare selezionati i due suddetti anni poiché per essi sono contemporaneamente disponibili i dati misurati relativi a tutte le grandezze necessarie alle elaborazioni: portate dei canali irrigui, soggiacenza della falda freatica, dati agrometeorologici.

L'equazione di bilancio è stata applicata con passo mensile, sia distinguendo tra le due porzioni del distretto ad est e ad ovest del torrente Erbognone che considerando la sua superficie totale. I valori delle portate in ingresso, I_i, e dei coli, I_o, si sono ottenuti sommando, a seconda della superficie considerata, le portate giornaliere dei canali che vi adducono acqua irrigua o che raccolgono le acque di colo. La pioggia, P, è quella misurata dalla stazione di Castello D'Agogna. L'evapotraspirazione dagli appezzamenti agrari (E_s, E_{H20}, T) , la risalita capillare nella zona di radicazione, C, la percolazione dagli appezzamenti, D_a, la variazione di umidità contenuta nel suolo radicato ΔU, sono simulati con i modelli idrologici suolo-suolo coltura. Per la sola coltura del riso con semina in acqua e

sommersione continua, dato il modello semplificato utilizzato (Par. 3.2.2.3), la percolazione netta dagli appezzamenti agrari (D_a - C) viene ricavata a partire dal valore di efficienza irrigua al campo selezionata, ed è dunque da considerarsi una stima di prima approssimazione.
In particolare, i modelli idrologici suolo-coltura consentono di stimare il fabbisogno irriguo al campo (al netto dunque delle perdite di trasporto e distribuzione per la consegna dell'acqua all'appezzamento agrario), che può essere definito come: $F_c = (E_s + E_{H20} + T) + (D_a - C) - P + \Delta U$.
A causa della carenza di informazioni non sono invece stati misurati o stimati i termini di evaporazione dai canali, E_{H20-C}, di percolazione dai canali, D_C, e di variazione del volume invasato al di sopra del piano campagna nelle camere di risaia, ΔS_{H20}, e nei canali ΔS_{H2O-C}, ma la loro somma è stata ottenuta come residuo dall'equazione di bilancio. A questi si aggiungono le possibili uscite superficiali dal sistema sotto forma di coli non monitorati I_{o2}. Sicuramente i termini D_C e ΔS_{H20} giocano il ruolo più importante, il secondo dei due fattori in particolare nei mesi in cui vengono allagate e asciugate la maggior parte delle risaie (rispettivamente ad aprile-maggio e settembre). Nelle elaborazioni si fa riferimento in particolare al residuo di bilancio percentuale, ottenuto sottraendo alla disponibilità irrigua netta ($I_i - I_o$) il fabbisogno irriguo F_c, e riportando la differenza ottenuta in termini percentuali rispetto alla stessa disponibilità irrigua netta.

Scenario di conversione della gestione irrigua del riso da sommersione continua a irrigazione intermittente
Dopo l'analisi del bilancio irriguo nel distretto irriguo di San Giorgio per gli anni 2010 e 2011, si è voluto valutare l'effetto di una conversione di tutte le superfici a riso in sommersione a riso aerobico sui fabbisogni irrigui territoriali, sulla ricarica alla falda freatica e sulla soggiacenza di quest'ultima dal piano campagna. Tale analisi si è condotta per gli anni 2008-2013 e 2003, utilizzando rispettivamente l'uso del suolo attuale (SIARL, 2011) e un uso del suolo generato sostituendo tutte le superfici a riso in sommersione con riso aerobico.
Il fabbisogno irriguo distrettuale nel caso di conversione completa del sistema di coltivazione del riso da tradizionale ad aerobico, dipende strettamente dal livello di soggiacenza di falda che si otterrebbe in tali condizioni. Difatti, la soggiacenza concorre a determinare la percolazione e la risalita capillare e, di conseguenza, i fabbisogni irrigui.
È pertanto necessario integrare le elaborazioni con un modello di falda, anche molto semplice, che permetta di legare percolazione netta e soggiacenza che è a sua volta indispensabile per determinare l'effetto complessivo del cambiamento di sistema di coltivazione sui fabbisogni irrigui.
Dato che l'area di studio è confinata da torrenti, le oscillazioni della soggiacenza di falda possono ritenersi, almeno in prima approssimazione, come dipendenti sostanzialmente solo dagli andamenti del flusso di percolazione netta (N = D - C). Su questa base è stato possibile trovare una funzione concettualmente valida che lega la soggiacenza alla percolazione stimata nel caso di uso del suolo attuale, in modo da poter poi ottenere la soggiacenza di falda per lo scenario con riso aerobico nota la relativa percolazione. Vengono di seguito riportati il semplice modello adottato ed i dati utilizzati per la sua applicazione.
<u>Modello di falda</u>. Per la falda si è scelto un modello autoregressivo con ingresso esogeno (ARX), che corrisponde qualitativamente al modello di un serbatoio perdente, e ha la forma:

$$H_{(t)} = H_{(t-1)} - a \cdot N_{(t)} + b \cdot H_{(t)} + c$$

Dove i è l'indice temporale (mese), H è la soggiacenza e N è la percolazione netta, mentre i parametri del modello sono a, b e c.
<u>Soggiacenze</u>. I valori di H sono stati presi dalle misure di soggiacenza del piezometro di Ottabiano che si ritiene essere sufficientemente rappresentativo per l'area est del distretto. In mancanza di riferimenti migliori le medesime misure sono state assunte anche per l'area ovest.

Percolazioni nette. Per lo stato di fatto si sono ottenute le percolazioni nette con il modello SWAP per le colture non irrigue e il mais. La percolazione netta dalle risaie in sommersione, in mancanza di un modello dettagliato che consenta di stimarla, è stata ottenuta come residuo del bilancio idrologico per la sola superficie occupata da riso in sommersione. Per tale calcolo si è adottata come portata irrigua per le aree con riso in sommersione quella totale, decurtata delle perdite per percolazione da canale D_C (ipotizzate pari al 20%), dei fabbisogni irrigui delle aree a mais $F_{c\text{-}mais}$ calcolati con SWAP e, infine, della variazione di volume idrico immagazzinato mensilmente nelle camere di risaia ΔS_{H20} e nel primo metro di suolo ΔU. Per lo scenario di cambio di uso del suolo, le percolazioni nette mensili sono state ottenute con il modello SWAP per tutte le combinazioni suolo-coltura.

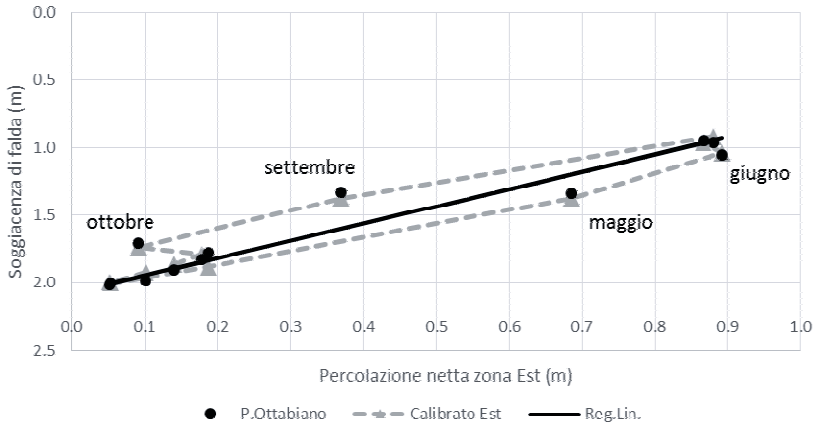


Figura 3.30. Valori di soggiacenza di Ottabiano in relazione alle percolazioni della zona Est (punti), valori simulati con il modello dinamico calibrato (triangoli) e con il modello lineare (retta nera)

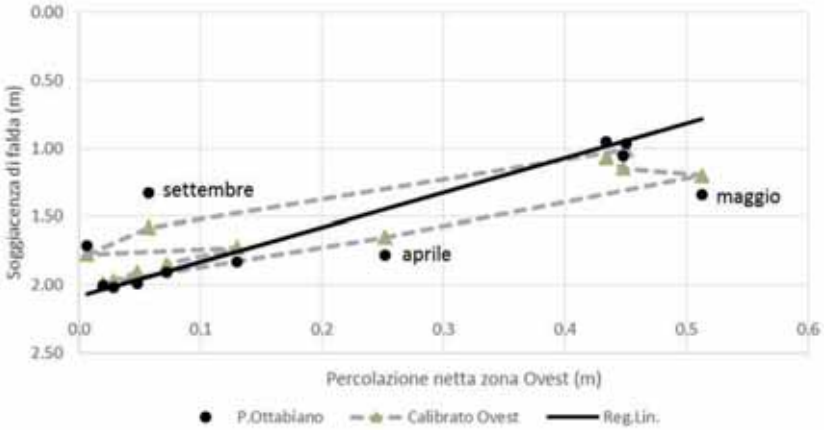


Figura 3.31. Valori di soggiacenza di Ottabiano in relazione alle percolazioni della zona Ovest (punti), valori simulati con il modello dinamico calibrato (triangoli) e con il modello lineare (retta nera)

Le Figure 3.30 e 3.31 rappresentano, per i sottodistretti est e ovest, i valori misurati (punti neri) e quelli simulati dal modello (triangoli grigi) della soggiacenza di falda in relazione alle percolazioni nette stimate nel caso dell'uso del suolo attuale. I modelli calibrati ai minimi quadrati) hanno mostrato di simulare in modo convincente gli andamenti di falda (R^2 = 0.9 per l'area est, e 0.8 per l'area ovest) e sono stati dunque adottati per determinare la soggiacenza estiva per lo scenario di conversione.

3.2.4 Indagini fisiologiche, ionomiche e metabolomiche

Nel corso delle stagioni 2011 e 2012 si è proceduto al monitoraggio in diverse fasi di sviluppo delle piante (accestimento, levata, botticella, piena fioritura, maturazione lattea, maturazione cerosa, piena maturazione) del loro stato fisiologico in funzione delle modalità di semina, della disponibilità di azoto e della tecnica irrigua

adottate nella prova parcellare dell'ENR. Oltre al prelievo di campioni di foglia da utilizzare in analisi di laboratorio sono state condotte misure *in vivo* non distruttive di fluorescenza fogliare (Handy PEA Chlorophyll Fluorescence System, Hansatech- UK), di contenuto in clorofilla e delle stato nutrizionale azotato (Dualex® Flavonols & Chlorophyll-Meter, ForceA- F).
Al termine delle stagioni risicole 2011 e 2012 sono stati acquisiti e catalogati campioni di risone delle varietà Gladio, Loto, Roma e Selenio provenienti dalle prove parcellari condotte presso i campi sperimentali dell'ENR e di CRA-Ris. Dopo sgranatura e sbamatura con idonei strumenti da laboratorio i campioni di riso integrale, di pula e riso bianco ottenuti erano sottoposti alle analisi ionomiche o prontamente congelati in azoto liquido e quindi conservati a -80 °C per le analisi metabolomiche e biochimiche.
Al termine delle due annate risicole con la collaborazione dei tecnici territoriali dell'ENR e il contributo dei ricercatori di CRA-RIS è stato reperito un numero consistente di campioni di risone delle varietà Loto, Baldo, Selenio e Gladio provenienti da aziende lombarde, piemontesi, venete e sarde. La granella integrale è stata sottoposta ad analisi ionomica mentre la pula da questa ottenuta è stata sottoposta alla analisi biochimiche.

Figura 3.32. Forno generatore di microonde e ICP-MS utilizzati per le analisi ionomiche

Le analisi ionomiche sono state condotte su riso integrale riso bianco e/o pula. Aliquote idonee del campione erano mineralizzati in HNO_3 al 65% in forno a microonde (Figura 3.32; Multiwave 3000 Solv, Anton Paar, Austria) adottando una procedura a due stadi di potenza. Le soluzioni mineralizzate erano analizzate con tecniche di spettrometria di massa a plasma accoppiato induttivamente (Figura 3.32; ICP-MS Aurora M90, Bruker Daltonik GmbH G) per la determinazione della concentrazione di: As, Ca, Cd, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, P, Se e Zn. Le soluzioni analizzate, così come quelle utilizzate per le procedure di calibrazione per ciascun elemento, erano addizionate con standard interni 20 mg L^{-1} di ^{72}Ge, ^{89}Y e ^{159}Tb. L'accuratezza delle analisi era verificata ricorrendo all'uso di una farina di riso di riferimento certificata (rice flour NIST SRM 1568a, NIST, USA) per i contenuti nei diversi elementi considerati. I livelli di N e S totali nelle farine sono stati invece stabiliti con l'uso di un analizzatore elementale NA-1500 N, Carlo Erba Instruments); anche in questo caso erano adottati opportuni controlli della qualità analitica delle prove condotte.
Nel caso dell'arsenico la determinazione quali-quantitativa delle diverse forme presenti nella granella è stata condotta con tecniche HPLC-ICP-MS secondo le procedure descritte da Zavala et al. (2008) e Lombi et al. (2009).
Le analisi metabolomiche sono state effettuate su campioni di pula. L'estrazione dei metaboliti della frazione polare della pula e la loro successiva derivatizzazione per l'analisi GC-MS è avvenuta secondo il protocollo proposto da Lisec et al. (2007) che prevede il trattamento del campione con metanolo preraffreddato addizionato di ribitolo come standard interno, l'aggiunta dopo agitazione e centrifugazione dei campioni di cloroformio preraffreddato a -20°C e dH_2O a 4°C ed una ulteriore centrifugazione per favorire la separazione delle fasi a diversa polarità. Aliquote della fase polare erano quindi essiccate in evaporatore centrifugo. Le analisi sono state condotte con uno strumento Agilent Technologies GC/MSD (GC 7890; MS 5975 singolo quadrupolo) secondo quanto previsto dal Golm Metabolome Database: http://csbdb.mpimp-golm.mpg.de/cgi-bin/madb2ml.cgi?org=msri&c=ml&o=ht&typ=met&inp=m%5B2%5D). L'analisi è stata condotta utilizzando una colonna DB-5 di 30m (Agilent Technologies). Come carrier è stato impiegato elio BIP™. Gli spettri sono stati

acquisiti in un range di m/z da 40 a 600 operando due scansioni al secondo con l'interfaccia a 250 °C e la sorgente ionica a 200°C utilizzando la ionizzazione per impatto elettronico a -70 eV.
L'analisi in silico dei cromatogrammi ottenuti è stata condotta utilizzando il software MetaboliteDetector 2.0 (Hiller et. al., 2009). I dettagli di tale analisi sono reperibili al sito http:/ www.biogesteca.unimi.it). I metaboliti identificati sono stati quantificati sulla base delle intensità degli ioni normalizzati per l'intensità lo ione 217 relativo allo standard ribitolo. I dettagli elativi all'analisi delle componenti principali (PCA), della regressione mutivariata Partial Least Square Discriminnat Analysis (PLS-DA) e i dettagli relativi alla tecnica di validazione delle variabili latenti (LV) sono riportati al sito http: www.biogesteca.unimi.it
Le analisi per la determinazione di livelli dei diversi componenti (tocoferoli e totrienoli) della vitamina E e del γ-orizanolo, così come quelli dell'acido fitico sono stati condotti sui campioni di pula provenienti dalla prova parcellare condotta pressa i campi sperimentali dell'ENR. Per la vitamina E e per il γ-orizanolo, come previsto da (Chen e Bergman, 2005) aliquote da 100 µg di pula di riso erano trattate con metanolo HPLC-grade e quindi centrifugati. Il surnatante così ottenuto era prelevato e filtrato attraverso filtri Millipore (MILLEX-HV PVDF 0,45 µm) e quindi conservati a -20°C in attesa di essere analizzati.

Figura 3.33. GC/MS e HPLC utilizzati per le analisi metabolomiche e biochimiche pula di riso

L'analisi HPLC dei campioni è stata eseguita secondo il metodo descritto da Chen e Bergman (2005) che prevede l'impiego di una colonna Novapack C18 3,9 x 150mm - 4 µm (Waters) dotata di precolonna. Nell'eluato i diversi tocoferoli e i diversi tocotrienoli erano analizzati tramite rivelatore UV-Vis (λ_{325nm}), mentre le diverse componenti del γ-orizanolo erano analizzate per via fluorimetrica (λ_{ecc} 298 nm; λ_{emm} 328 nm). La quantificazione del γ-oryzanolo è stata effettuata sommando le aree dei tre picchi (cicloartenil ferulato, 24-metilencicloartenil ferulato e campesteril ferulato) costituenti il γ-oryzanolo totale e riferendosi ad una curva standard ottenuta con un γ-oryzanolo commerciale.
Il contenuto in olio totale della pula è stato determinato secondo il metodo descritto da Zigoneau et al. (2008).

3.2.5 Indagini molecolari

3.2.5.1 Risposte geniche alle alte temperature: approccio di RNA-sequencing

Le nuove tecnologie di sequenziamento massivo degli acidi nucleici, permettono di condurre analisi su larga scala a costi sempre più accessibili. Tra le applicazioni più interessanti vi è la possibilità di caratterizzare, in modo qualitativo e quantitativo, l'intero trascrittoma di un determinato organo o tessuto o tipo cellulare, e in particolare tutte le specie di RNA messaggero. La tecnologia è nota con il nome di RNA-sequencing (RNA-seq). La presenza di uno specifico RNA messaggero, è la conferma che il gene da cui viene trascritto è attivo in quelle cellule, e che vi è probabilmente la sintesi del putativo prodotto proteico. Disponendo di dati di RNA-seq, è possibile effettuare un'analisi bioinformatica dei putativi prodotti proteici, e quindi predire i meccanismi cellulari e metabolici attivi e/o alterati in un dato campione sottoposto ad un specifico trattamento. Nel caso di questa ricerca, l'analisi RNA-seq, condotta su campioni di ovari di N22 in fase di impollinazione, è stata effettuata mettendo a confronto campioni raccolti da piante in fioritura mantenute in condizioni standard (29°C), con campioni provenienti da piante sottoposte a un breve ma forte stress da alta temperatura (38°C). La

sperimentazione si è svolta in collaborazione con l'International Rice Research Institute (IRRI) che ha sede nelle Filippine) ed è stata condotta in serre e camere di crescita idonee a garantire sia le condizioni di temperatura richieste sia la ripetibilità degli esperimenti. Le piante di N22 sono state cresciute, fino alla fioritura, in condizioni di temperatura standard (29°C). Durante la fioritura, i fiori sono stati marcati durante l'apertura delle glume e l'impollinazione, dopo trenta minuti i fiori sono stati raccolti e dissezionati in ghiaccio; gli ovari impollinati sono stati congelati in azoto liquido, e conservati a -80°C fino all'estrazione e purificazione dell'acido ribonucleico. Questi campioni hanno costituito i controlli (3 repliche biologiche, ciascuna costituita da alcune centinaia di pistilli di cinque piante indipendenti). La raccolta dei campioni per l'esperimento di stress da alte temperature, è stata condotta nello stesso modo, ma le piante utilizzate sono state spostate in una cella a 38°C durante i trenta minuti intercorsi tra l'apertura delle spighette e la campionatura. La caratterizzazione del trascrittoma di questi campioni è stata effettuata in Italia, mediante piattaforma Illumina-Solexa presso la Fondazione Filarete.

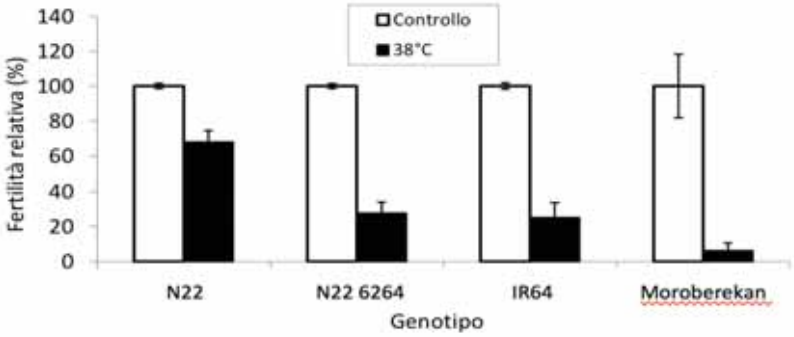


Figura 3.34. Illumina Genome Analyzer e fertilità percentuale relativa di alcune varietà di riso in condizioni di alta temperatura

I dati, analizzati utilizzando il Software CLC Genomics Workbench mostrano, come poi confermato da esperimenti di PCR quantitativa, che 630 geni rispondono al trattamento di stress da alta temperatura con un'elevata significatività statistica. In base ad analisi di ontologia e della letteratura disponibile, 46 di questi geni sono stati giudicati d'interesse prioritario e quindi le loro risposte all'alta temperatura sono state analizzate in varietà di riso diverse note per una diversa tolleranza a questo tipo di stress (Figura 3.34).
Nella sperimentazione è stata inserita anche l'accessione N22 6264 dell'IRRI che seppur fenotipicamente indistinguibile da N22 presenta rispetto a questa caratteri una maggiore sensibilità alle alte temperature (Figura 3.34). La similarità genetica di N22 6264, con N22 ha permesso di considerarla come genoma di riferimento ideale per le analisi molecolari comparative. Quindi, si è proceduto con un nuovo esperimento campionando separatamente antere mature, pistilli maturi e pistilli impollinati, raccolti in condizioni di controllo e di stress a 38°C, dalle varietà N22 (controllo tollerante), N22 6264 e IR64 (sensibili) e Moroberekan (altamente sensibile). L'espressione dei quarantasei geni candidati è stata monitorata e comparata tra tutte le varietà mediante PCR quantitativa.

3.2.5.2 Identificazione di geni espressi nelle cellule di guardia del riso

Analisi in silico

E' stata effettuata una ricerca nel proteoma di riso utilizzando un domino conservato nelle proteine R2R3MYB appartenenti al sottogruppo di AtMYB60. Per la ricerca e gli allineamenti delle proteine è stato utilizzato modulo AlignX®, basato sul sistema ClustalW (Mega4 Software). Gli alberi filogenetici sono stati costruiti utilizzando il metodo Neighbour Joining (NJ) in MEGA 4 e validati tramite analisi bootstrap.

Analisi di espressione

L'analisi di espressione dei geni candidati è stata effettuata tramite Quantitative Real Time RT-PCR (qPCR), utilizzando il kit Brilliant® SYBR® Green QPCR Master Reagent Kit (Stratagene) e il sistema di rilevamento Mx3000P (Stratagene).

Purificazione di cellule di guardia da foglie di riso

Per l'ottenimento di campioni di RNA derivati da cellule di mesofillo e da cellule di guardia di riso è stato utilizzato il servizio di microdissezione laser messo a disposizione dal partner Fondazione Filarete (microdisettore LEICA LMD6000).

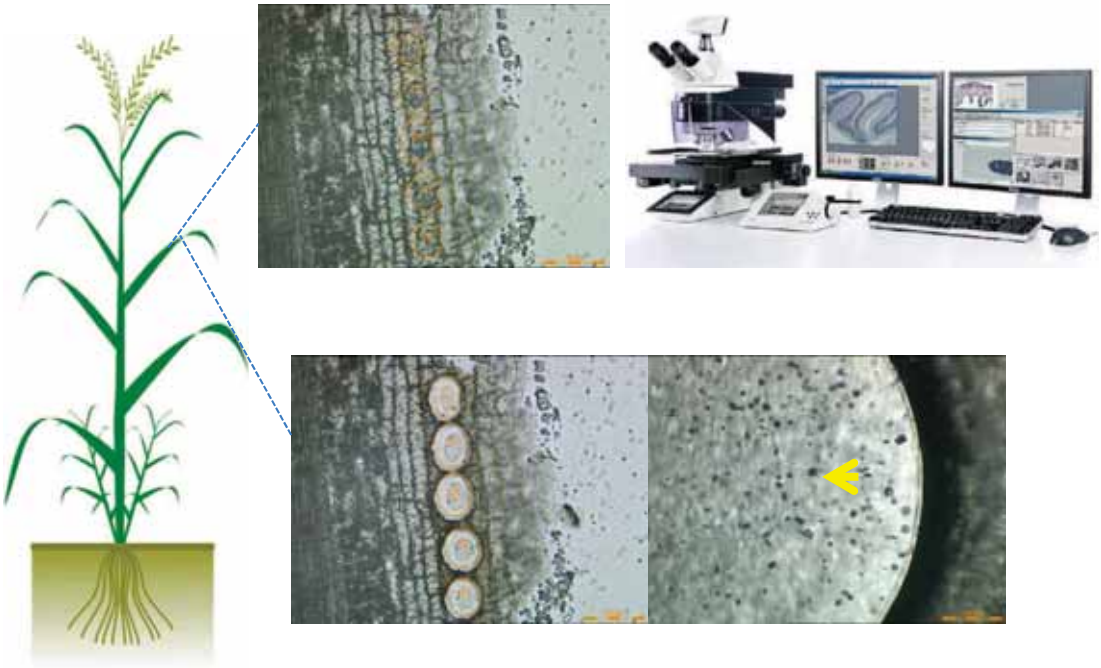


Figura 3.31. Laser Microdissection

Analisi e validazione di promotori stoma-specifici

Sono state costituite diverse versioni di promotori cellula di guardia-specifici, attraverso delezioni seriali e mutagenesi sito-specifica di putativi *cis*-motifs, così come descritto in Cominelli et al. (2011). I diversi promotori, fusi al gene reporter GUS, sono quindi stati usati per la trasformazione del riso (cv Nipponbare), avvalendosi del servizio di trasformazione disponibile presso il partner Fondazione Filarete. Le linee T1 e T2 così ottenute sono state analizzate tramite saggio colorimetrico GUS per mettere in evidenza i domini di attività dei promotori. Allo stesso modo, sono state prodotte linee di Arabidopsis esprimenti il gene reporter GUS sotto il controllo di promotori di riso attivi in cellule di guardia. La trasformazione di riso e Arabidopsis è stata realizzata come descritto in Rusconi et al, (2013).

3.2.6 Indagini microbiologiche

Campionamento

Il campionamento di piante di riso (varietà Baldo) è stato effettuato presso il campo sperimentale allestito ENR Per quanto riguarda il regime irriguo è stata selezionata come unica tesi la coltivazione in condizioni di semina interrata e irrigazione turnata (IRR) partendo dall'assunzione che i batteri associati alle piante coltivate con questa pratica siano maggiormente adattati alle carenze idriche. Nel caso della concimazione sono state prese in considerazione entrambe le tesi, trattato con concimazione azotata (+N) e non sottoposto a concimazione azotata (-N), in modo da valutare gli effetti delle concimazioni sulle comunità batteriche sottoposte a stress idrico.

Ciascun campionamento è stato realizzato in triplicato e in condizioni di sterilità. Ogni replica è costituita dall'insieme di 3-5 piante per le quali sono stati prelevati campioni di tessuti radicali e suolo rizosferico.

Una volta in laboratorio, per ciascun campione la frazione rizosferica (R) è stata separata dalle radici, dalle quali è stata successivamente ricavata, previa sterilizzazione superficiale, la frazione endofita (E) costituita dai batteri che colonizzano la parte interna della pianta. Le frazioni così suddivise sono state conservate a 4°C per gli isolamenti di batteri PGP coinvolti nella protezione della pianta durante lo stress idrico.

Figura 3.36. Campionamento della rizosfera di piante di riso della cultivar Baldo presso la prova parcellare allestita dall'ENR

Isolamento e propagazione dei ceppi

La frazione endofita e quella rizosferica delle piante di riso trattate e non con concimazione azotata sono state quindi usate come inoculo per l'isolamento di ceppi aventi attività ACC-deaminasica (Penrose and Glick, 2003). Tale enzima è in grado di degradare l'ACC (acido 1-aminociclopropan carbossilico), l'immediato precursore dell'etilene, ad ammoniaca e α-chetobutirrato. L'etilene è uno dei principali fitormoni, coinvolto nella risposta della pianta allo stress: in condizioni avverse l'innalzamento delle concentrazioni di etilene in planta determina un arresto dei principali meccanismi di crescita. La degradazione dell'ACC ad opera dell'ACC-deaminasi batterica consente quindi di alleviare i principali sintomi negativi legati alla presenza dello stress e al contempo favorire la crescita vegetale e la produttività delle colture stesse (Siddikee et al., 2010). Gli isolati così ottenuti sono stati propagati sullo stesso terreno colturale impiegato per l'isolamento iniziale e conservati dopo aggiunta del 25% di glicerolo come crioprotettivo a -80°C per le successive analisi.

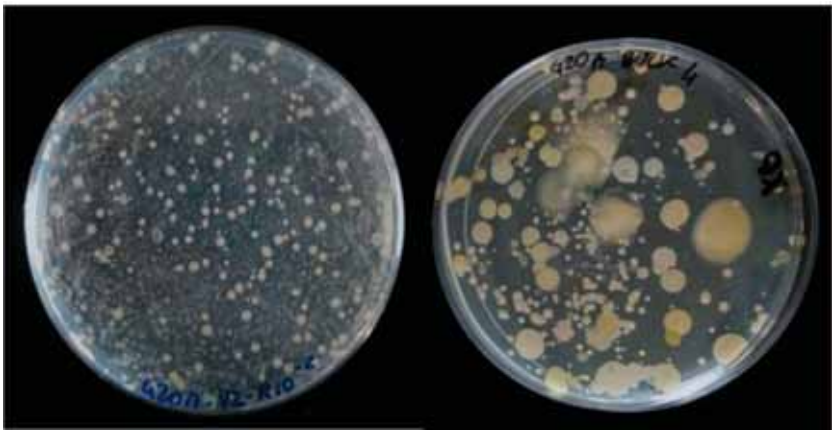


Figura 3.37. Isolamento dei batteri con attività ACC deaminasi

Analisi ITS-PCR fingerprinting e selezione dei singoli ceppi

La collezione microbica è stata de-replicata attraverso un'analisi ITS-PCR fingerprinting, con lo scopo di ridurne la ridondanza filogenetica (Marasco et al., 2012). L'analisi ha permesso di suddividere la collezione di isolati in gruppi costituiti da ceppi batterici appartenenti alla stessa specie/sottospecie. Da ogni gruppo è stato selezionato un singolo ceppo per i successivi screening volti a valutarne le potenzialità di promozione della crescita vegetale in vitro. In particolare, gli isolati batterici sono stati saggiati per attività correlate: i) ad un miglioramento dello stato nutrizionale della pianta quali la solubilizzazione del fosfato inorganico presente nei suoli (Mehta and Nautiyal, 2001) e l'aumento della biodisponibilità del ferro tramite rilascio di siderofori (Schwyn and Neilands, 1987); ii) all'influenza diretta sull'omeostasi degli ormoni vegetali tramite sintesi dell'auxina acido 3-indolacetico (Bric et al., 2001), coinvolta nell'estensione e proliferazione radicale e attività ACCdeaminasica (Penrose and Glick, 2003) e iii) per la sintesi di esopolisaccaridi (Santaella et al., 2008) in grado di favorire la colonizzazione radicale tramite formazione di una matrice polisaccaridica che facilita l'adesione al rizoplano e che è coinvolta anche nella ritenzione di molecole d'acqua nell'intorno della radice formando biofilm estremamente idrofilici.

I ceppi analizzati sono stati identificati tramite analisi molecolare mediante il sequenziamento parziale del gene 16S rRNA. Gli ampliconi 16S rRNA sono stati sequenziati da MACROGEN (Korea), e le sequenze ottenute sono state confrontate con quelle presenti nelle banche dati NCBI (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/) e Ribosomal Database Project (http://rdp.cme.msu.edu/).

3.2.7 Indagini economiche

3.2.7.1 Fasi preliminari e raccolta dati

La fase preliminare alle analisi più prettamente economiche, ha previsto innanzitutto l'elaborazione di specifici questionari da sottoporre ad un campione di aziende risicole individuate all'interno dell'area di interesse, per la rilevazione dei dati tecnici ed economici aziendali (si veda riquadro sottostante).

Questionario aziendale: informazioni richieste

* provenienza e fonti di approvvigionamento della risorsa (consortile/privata, da fiumi, pozzi o colature);
* modalità di consegna (continua/turnata), con eventuale specificazione di turno ed orario;
* tipologie tariffarie applicate e relativo canone;
* superficie aziendale irrigua e ripartizione della stessa tra le diverse metodologie di gestione dell'acqua (sommersione tradizionale e ritardata, irrigazione periodica);
* resa produttiva media;
* calendario degli adacquamenti;
* modalità esecutive degli adacquamenti (tipologie di macchinari adoperati, eventuali cantieri di lavoro utilizzati, forza lavoro impiegata).

In secondo luogo sono state selezionate le aziende campione, tramite estrazione dalla banca dati regionale SIARL delle aziende risicole operanti nel comune di San Giorgio di Lomellina (PV). Queste sono state successivamente ripartite in classi dimensionali sulla base della SAU investita a riso ed all'interno di ciascuna di esse è stato realizzato il campionamento di quelle presso le quali rilevare i dati, in collaborazione con il consorzio irriguo operante nell'area (Associazione Irrigazione Est Sesia, AIES), per un totale di oltre 730 ha.

Tabella 3.9. Classificazione dimensionale delle aziende risicole estratte

SAU a riso [ha]	*Aziende operanti [n.]*	*Aziende campionate [n.]*
< 1	8	0
1 – 9,99	17	3
10 – 29,99	15	6
>30	16	10
Totale	***56***	***19***

Infine, si è proceduto alla raccolta dei dati mediante somministrazione diretta del questionario ai conduttori delle aziende campione, ricorrendo alla rilevazione diretta presso le stesse, in collaborazione con i tecnici di Agricola 2000 SpCA, AIES ed Ente Nazionale Risi (ENR).

3.2.7.2 I dati rilevati: l'utilizzo dell'acqua nell'area di studio

Le informazioni rilevate presso le aziende dimostrano la presenza di soluzioni irrigue alternative rispetto alla conduzione tradizionale della risaia. La scelta di adottare l'una o l'atra dipende dalla tipologia di dispensa fornita dal consorzio, ed, a parità di questa, si aggiungono le scelta agronomiche operate dai singoli agricoltori (Tabella 2) Ad ogni gestione corrispondono diversi volumi idrici somministrati nel corso della stagione (Tabella 3). Come intuibile, alla conduzione tradizionale con sommersione continua e semina in acqua sono imputabili le maggiori quantità idriche, mentre a parità di dispensa la sommersione ritardata (SR) risulta una tecnica che richiede minori quantitativi di risorsa. Al contrario, la dispensa turnata assicura la distribuzione di una minore quantità d'acqua, soprattutto se abbinata alla semina interrata. Tuttavia è facilmente individuabile il dato anomalo relativo alla gestione "SCT": il consumo idrico in questo caso risulta troppo basso rispetto a valori medi ipotizzabili. Tale incongruenza è da ricondurre ad una stima poco accurata del volume distribuito; inoltre, essendo relativo ad una sola azienda che copre solo 3,5 ha, considerare questa categoria può essere fuorviante per le successive considerazioni sui risultati. Per tale motivo nel seguito dell'analisi tale modalità non viene considerata.

Tabella 3.10. La gestione dell'acqua nelle aziende campione

Gestione della risaia	*Dispensa*	*Gestione dell'acqua*		*Gestione agronomica*	*Aziende [n.]*	*% SAU*
Sommersione tradizionale (ST)	Continua	Sommersione continua, interrotta da 3 o 4 asciutte in corrispondenza di trattamenti diserbanti o fertilizzanti.		Semina in acqua	10	*50,31*
Sommersione ritardata (SR)				Semina interrata e sommersione ritardata alla 4-5 foglia.	5	*8,45*
Turnata tradizionale (TT)	Turnata	Sommersioni intermittenti. L'acqua è disponibile solo nell'arco di turni prestabiliti.	Sommersione continua durante il turno	Semina in acqua	1	*8,18*
Turnata ritardata (TR)				Semina interrata e immersione ritardata	2	*10,22*
Scorrimento tradizionale (SCT)			Irrigazione per scorrimento, tentando di mantenere l'acqua sul campo fino al turno successivo.	Semina in acqua	1	*0,48*
Scorrimento ritardata (SCR)				Semina interrata e sommersione ritardata	6	*22,36*

Tabella 3.11. Volumi stagionali dispensati [m^3 ha^{-1}] nelle aziende campione

Gestione idrica	*Volume idrico dispensato*
ST	*22.780*
SR	*20.842*
TT	*13.012*
TR	*7.646*
SCT	*726*
SCR	*4.951*

3.2.7.3 Le analisi economiche: stime effettuate

In seguito alla raccolta, si è proceduto con l'analisi e l'elaborazione dei dati rilevati, al fine di determinare l'attuale situazione economica e produttiva del sistema d'indagine, descrivendo le caratteristiche strutturali delle aziende, la gestione dei loro input produttivi (terra, acqua, lavoro) e le performance delle stesse (ricavi, costi di fornitura e di gestione dell'acqua, margini, costo e produttività dell'acqua). Di seguito sono riportate le stime effettuate.

Volumi distribuiti

Sulla base del calendario degli adacquamenti fornito dagli agricoltori è stato stimato il volume idrico distribuito nel corso della stagione ($Vol_{f,c}$) a carico di ogni azienda f per ogni tipologia gestionale c (cfr. Tabella 3.11), in funzione della portata dispensata (q_c, in l s^{-1} ha^{-1}), della durata della stagione irrigua e delle sommersioni o degli adacquamenti ($dur_{f,c}$), e della superficie dedicata ($a_{f,c}$):

$$Vol_{f,c} = a_{f,c} * dur_{f,c} * q_c * 3,6$$

Costi totali connessi all'irrigazione

I costi totali sostenuti per l'irrigazione (CT) approssimano per ogni azienda il costo d'uso dell'acqua. Essi comprendono le voci relative alla fornitura (C_F) e quelli connessi alla gestione (C_G) (Castellani et al., 2008):

$$CT = C_F + C_G = C_f + (CMR + CCL + Man + Qd + Sv + I)$$

I costi di gestione tengono conto dei costi per la manutenzione e riparazione dei macchinari connessi alla pratica irrigua (CMR), dei costi per i materiali di consumo (CCL), dei costi di manodopera (Man), della quota di deperimento dei macchinari (Qd), di spese varie (Sv) comprendenti ricovero e sorveglianza, imposte, tasse, assicurazioni, IRAP, di interessi (I) (interessi sul capitale agrario, prezzo d'uso dei fabbricati per ricovero macchinari), pari queste ultime al 5% dei costi totali.

Costo dell'acqua
È stato quantificato il prezzo unitario (PU) dell'acqua di irrigazione [€ m^{-3}], definito dal rapporto tra l'ammontare dei costi totali CT e la quantità lorda d'acqua stagionale distribuita al campo:

$$PU = CT / volume\ distribuito$$

Ricavi derivanti dalla produzione di riso
I ricavi aziendali totali (RT, in €) sono stati calcolati in base al valore della produzione ottenuta a cui si sommano gli aiuti comunitari ricevuti:

$$RT = VP + C$$

Il valore della produzione (VP) dipende dalle superfici investite in ciascuna azienda (a), dalle rese (Y) e dal prezzo di vendita (p) del prodotto:

$$VP = a_{f,c} * Y_{f,c} * p$$

In particolare le rese produttive utilizzate derivano dai risultati sperimentali condotti presso il centro ENR a Castello d'Agogna (PV), condotte dai tecnici dello stesso e dall'Istituto di Idraulica Agraria. Dalle sperimentazioni svolte emergono significative differenze nelle rese produttive a seconda della varietà coltivata e delle modalità di irrigazione (Tabella 3.12).

Tabella 3.12. Rese medie [t ha^{-1}] annuali (2011, riga superiore e 2012, riga inferiore)

	Semina in acqua	*Sommersione ritardata*	*Irrigazioni periodiche*
Gladio	9,40	7,96	9,73
	10,27	6,88	10,47
Baldo	8,33	7,81	9,72
	9,79	6,80	9,28
Loto	8,72	9,36	10,33
	9,61	7,68	8,77
Selenio	9,44	8,47	8,71
	10,33	9,01	11,14
Media	***9,49 ± 0,69***	***8,00 ± 0,92***	***9,77 ± 0,85***

Dato che le tipologie gestionali considerate dalle sperimentazioni sono differenti da quelle rilevate direttamente nelle aziende, è stata effettuata una corrispondenza per attribuire ad ogni modalità di fornitura dell'acqua realmente adottata nel comprensorio, il relativo valore di dispensa (Tabella 3.13), sulla base del quale stimare i consumi idrici stagionali:

Tabella 3.13. Approssimazioni adottate per il running del modello

Tipologia gestionale come da rilevazioni	*Tipologia gestionale come da sperimentazioni*	*Dispensa ($l\ s^{-1}\ ha^{-1}$)*
ST e TT	*Semina in acqua*	2,4
SR e TR	*Sommersione ritardata*	2,4
SCT e SCR	*Irrigazioni periodiche*	1,5

Il prezzo di vendita attribuito al prodotto rappresenta la media biennale del periodo 2011-2012 dei prezzi massimi mensili, registrati da Granaria e forniti da ENR (Tabella 3.14):

Tabella 3.14. Prezzi medi [€ t^{-1}] annuali e biennali per le diverse varietà coltivate

	2011	*2012*	*Media biennale*
Gladio	28,5	30,0	30,6
Baldo	38,6	34,3	36,6
Loto	36,8	30,3	33,8
Selenio	33,0	33,0	31,6
Media	***34,2 ± 4,5***	***31,9 ± 2,1***	***33,14 ± 2,6***

Gli aiuti comunitari erogati (C) tengono conto di un premio medio di 850 € ha^{-1} e una detrazione dell'8% per le quote eccedenti i 5000 €:

$$C = 850 * a_{f,c}$$

$$Se\ C > 5000\ allora\ C = 850 * a_{f,c} * (0{,}08 * (850 * a_{f,c} - 5000))$$

Margini aziendali

I margini aziendali (*ma*, in €) sono calcolati come differenza tra i ricavi totali ed i costi totali connessi con l'irrigazione:

$$ma = RT - CT$$

A seguito del running del modello nei diversi scenari, emerge il valore di *trade-off,* o costo opportunità, che esprime di quanto il margine aumenta o diminuisce al variare della tipologia gestionale dell'acqua, e quindi al variare dei consumi idrici.

Produttività dell'acqua

Infine è stata stimata la produttività dell'acqua per la coltura nelle diverse condizioni di tecnica irrigua.

Da un punto di vista agronomico (*AWP*) essa esprime quante unità di risorsa sono necessarie per ottenere un'unità di prodotto, come rapporto tra la resa media totale (in t) e la quantità d'acqua (in m^3) evapotraspirata (Kassam e Smith, 2001; Molden, 1997); nel presente caso la quantità prodotta è stata invece rapportata alla quantità complessiva di acqua (m^3) che si stima essere impiegata nel corso della stagione, al lordo delle perdite di rete. Una simile produttività la definiamo "*produttività dell'acqua irrigua*" (*Irrigation Water Productivity – IWP*):

$$IWP = resa\ totale\ /\ volume\ distribuito$$

Da un punto di vista più prettamente economico, il medesimo concetto è esprimibile sulla base del valore economico della coltura (*Economic Water Productivity – EWP*), funzione del suo prezzo di mercato (Igbadun et al., 2006; Palanisami and Suresh Kumar, 2006; Teixeira et al., 2008; Vazifedoust et al., 2008):

$$EWP = ricavi\ da\ vendita\ /\ volume\ distribuito$$

3.2.7.4 Le analisi economiche: il modello di programmazione e gli scenari analizzati

Definiti i dettagli tecnici ed economici sull'uso dell'acqua irrigua e sui risultati aziendali, è stato impostato un modello di ottimizzazione al fine di simulare le scelte gestionali di fronte a variazioni delle variabili rilevanti ed a scenari di politica ambientale.

Il modello utilizza quale funzione obiettivo la massimizzazione dei margini lordi delle aziende (indice *f*), valutando quale sia la ripartizione ottimale delle superfici – assunte come variabili decisionali $xcrop_{f,c}$ - tra le diverse tipologie gestionali (indice *c*) che realizza tale obiettivo:

$$Z = ma = RT - CT$$

$$Obj = max\ Z$$

$$Z = \Sigma_{f,c}\ (r * xcrop_{f,c} - 0{,}08 * (r * xcrop_{f,c} - 5000) + (p * y_{f,c} * xcrop_{f,c}) - 100/95 * (xcrop_{f,c} * (w + wc * i * 3{,}6 * dur_{f,c})) + (o * Vo_f) + (Vo_f * ((1 - td) / n)) + (2 * l * xcrop_{f,c} * inttot_f) + (xcrop_{f,c} * (pwr_f/69) * (hhat_{f,c} * (9{,}4 * fp + 0{,}04 * op) + 7{,}65 * int_{f,c})) + (m_f * ((n * xcrop_{f,c} * hhat_{f,c})^{(k-1)}) * xcrop_{f,c} * hhat_{f,c})))$$

Il modello elaborato è stato posto soggetto a vincoli relativi ai fattori produttivi acqua e terra; per quanto attiene il primo aspetto, viene assicurata, in uscita dal modello, al più la medesima portata idrica che il consorzio dispensa (*i*, 4 l s^{-1} ha), calcolata dallo stesso sulla base dello stimato fabbisogno idrico della coltura:

$$\Sigma_c\, xcrop_{f,c} * i = \Sigma_c\ a_{f,c} * i$$

Per quanto riguarda le superfici, si assicura che venga coltivata tutta la superficie agricola aziendale *($land_f$*, in ha):

$$\Sigma_c\, xcrop_{f,c} = land_f$$

e che sia mantenuta la stessa tipologia di dispensa dell'acqua per la medesima superficie dichiarata in origine ($a_{f,c}$, in ha); si è determinato in tal modo il vincolo per le superfici a dispensa continua:

$$xcrop_{f,"ST"} + xcrop_{f,"SR"} = a_{f,"ST"} + a_{f,"SR"}$$

e a dispensa turnata:

$$xcrop_{f,"TT"} + xcrop_{f,"TR"} + xcrop_{f,"SCT"} + xcrop_{f,"SCR"} = a_{f,"TT"} + a_{f,"TR"} + a_{f,"SCT"} + a_{f,"SCR"}$$

3.2.7.5 Gli scenari analizzati

Il modello così implementato è stato utilizzato per valutare due principali scenari. In particolare:

- Scenario #1: come dovrebbero essere gestite le superfici aziendali affinché si abbia la massimizzazione dei margini lordi?
- Scenario #2: l'ottimizzazione é applicata, ferme restando le altre condizioni del sistema, in presenza di una tariffa volumetrica [€ m^{-3}] che sostituisce quella attualmente in vigore [€ ha^{-1}]. Il valore di tale tariffa (0,219 € m^{-3}) è individuato tramite una funzione obiettivo secondaria. Tale valore è stato definito a partire da una funzione obiettivo che include i medesimi parametri del modello descritto, ma che intende trovare il valore limite della tariffa per cui si assiste al cambio di gestione dell'acqua. A tal fine si è posta l'uguaglianza tra i margini con valori noti di superficie e quelli in cui gli stessi compaiono come variabili, e come ulteriore variabile incognita è stata introdotta la tariffa volumetrica stessa.

Per ogni scenario sono state analizzate le performance economiche a seguito dell'adozione rispettivamente delle superfici ottimali restituite nel primo caso (*post-opt*) e della diversa tipologia tariffaria (*tar_vol*), rimanendo invariate tutte le altre condizioni.

4 Risultati ottenuti

4.1 Aspetti agronomico-colturali delle diverse gestioni irrigue

4.1.1 Produzione e fattori della produzione (sito ENR di Castello d'Agogna)

Considerando i valori medi di produzione delle parcelle concimate e dei testimoni (Figura 4.1), i due anni di sperimentazione hanno mostrato un'evidente differenza (Figura 4.2).

Figura 4.1. Campo sperimentale: le quattro varietà e le parcelle con differenti apporti di azoto

Il 2011 ha fatto registrare le migliori performance di tutte e quattro le varietà esaminate nella tecnica tradizionale, caratterizzata da semina in acqua e sommersione continua della coltura (FLD). I maggiori risultati produttivi sono stati ottenuti dal Baldo (9,0 t ha^{-1}), seguito da Loto (8,4), Gladio (8,0) e Selenio (7,8). Le altre due tecniche hanno invece fatto registrare prestazioni inferiori, con rese unitarie comparabili, nel caso del Baldo e del Loto. Una maggiore differenza è invece stata riscontrata nel caso del Selenio e nel Gladio, dove la tecnica con sommersione posticipata in 3°-4° foglia ha ottenuto una performance superiore di 1 t rispetto alla tecnica con irrigazioni turnate.

Nel 2012 si è assistito ad un notevole incremento produttivo della semina interrata e sommersione posticipata rispetto all'anno precedente, superiore di più di 1 t ha^{-1} per tutte e quattro le varietà analizzate.

La semina in acqua, invece, ha mostrato un andamento diverso per ciascuna varietà: mentre nel Gladio il valore ottenuto nel 2012 ha confermato il risultato dell'anno precedente, nel caso del Selenio la produzione ha mostrato un aumento, passando da 7,8 t ha^{-1} del 2011 a 8, t ha^{-1} del 2012. Andamenti opposti sono stati registrati, invece, nel caso del Baldo e del Loto, che nel 2012 hanno mostrato una minore efficacia della tecnica tradizionale di gestione dell'acqua, con decrementi di risone prodotto pari a 1,5 t ha^{-1} circa rispetto all'annata precedente.

Anche nel 2012 i minori risultati produttivi sono stati ottenuti dalla tecnica con irrigazioni turnate, con le peggiori performance del Gladio e del Baldo (5,3t ha^{-1}).

Passando ad osservare i risultati ottenuti dalle parcelle concimate e testimone, è apparso evidente come per tutte e quattro le varietà analizzate e per entrambi gli anni di sperimentazione l'apporto di azoto abbia permesso di ottenere performance produttive maggiori rispetto ai testimoni non concimati (Figura 4.3).

Nel 2011 le parcelle concimate e testimone hanno mostrano un andamento simile all'interno di ciascuna varietà gestita nelle tre tecniche di gestione dell'acqua. In entrambi i set di dati, la semina in acqua si è dimostrata il trattamento migliore, ad eccezione del Selenio sottoposto a fertilizzazione, dove l'incremento produttivo più elevato è stato ottenuto dalla semina interrata e sommersione posticipata.

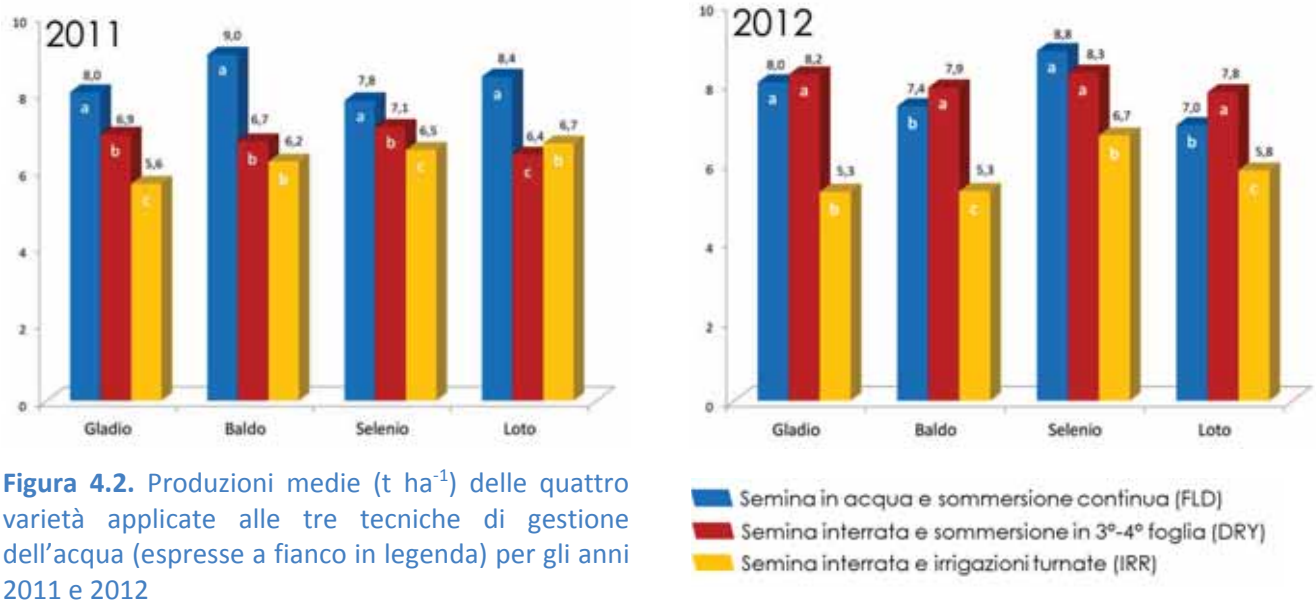


Figura 4.2. Produzioni medie (t ha^{-1}) delle quattro varietà applicate alle tre tecniche di gestione dell'acqua (espresse a fianco in legenda) per gli anni 2011 e 2012

La tecnica della semina interrata e irrigazioni turnate si è dimostrata in entrambe le condizioni di nutrizione azotata la meno performante, con l'unica eccezione del Loto sottoposto a concimazione, dove è stato raggiunto un risultato molto buono, inferiore di 1 t ha^{-1} alla migliore produzione ottenuta dalla semina in acqua.

Anche nel 2012 l'apporto di concime azotato è stato determinante nel consentire un incremento di produttività. In generale, si è evidenziato un equilibrio tra la tecnica tradizionale e la sommersione posticipata, mentre le parcelle condotte con irrigazioni turnate hanno riportato una maggiore differenza nelle prestazioni. Considerando i testimoni, a differenza del 2011, l'allineamento tra le performance della semina in acqua e quella della semina interrata con sommersione in accestimento è apparso molto evidente. Rispetto all'annata precedente, poi, le prestazioni delle varietà hanno mostrato una maggiore variabilità tra le tecniche di gestione dell'acqua. La semina in acqua non si è più affermata come la più produttiva, ottenendo il miglior risultato solamente nel caso del Selenio.

La tecnica con sommersione posticipata ha riportato i migliori risultati nel Loto in entrambi i trattamenti di fertilizzazione. Al contrario le produzioni ottenute con le irrigazioni turnate sono risultate sempre le più basse sia per le parcelle concimate, sia per le testimone, presentando risultati inferiori da 1,9 a 3,6 t ha^{-1} rispetto alla tecnica più produttiva.

Oltre a rilevare la resa unitaria, per ciascuna varietà coltivata nelle tre differenti tecniche di gestione dell'acqua sono stati elaborati i risultati delle principali componenti della produzione. Per descrivere al meglio tali dati, vengono riportate qui di seguito le performance relative ad ogni singola varietà ottenute nel corso del biennio indagato, considerando solo la tesi che ha previsto l'apporto di fertilizzante azotato.

Gladio

La migliore performance produttiva della semina in acqua ottenuta nel 2011 (9,7 t ha^{-1}) è stata influenzata da un più elevato investimento finale (876 culmi m^{-2}) e da una media percentuale di sterilità (15,8%). L'alto rendimento della semina interrata e sommersione posticipata è collegabile, invece, ad un più elevato numero di spighette per pannocchia (100) e alla minore sterilità riscontrata in questo trattamento (14,5%). La tecnica delle irrigazioni turnate ha risentito negativamente del maggior numero di spighette vuote (20.2%), dovute alle basse temperature registrate in fase di microsporogenesi, e alla maggior presenza di infezioni di Piriculariosi.

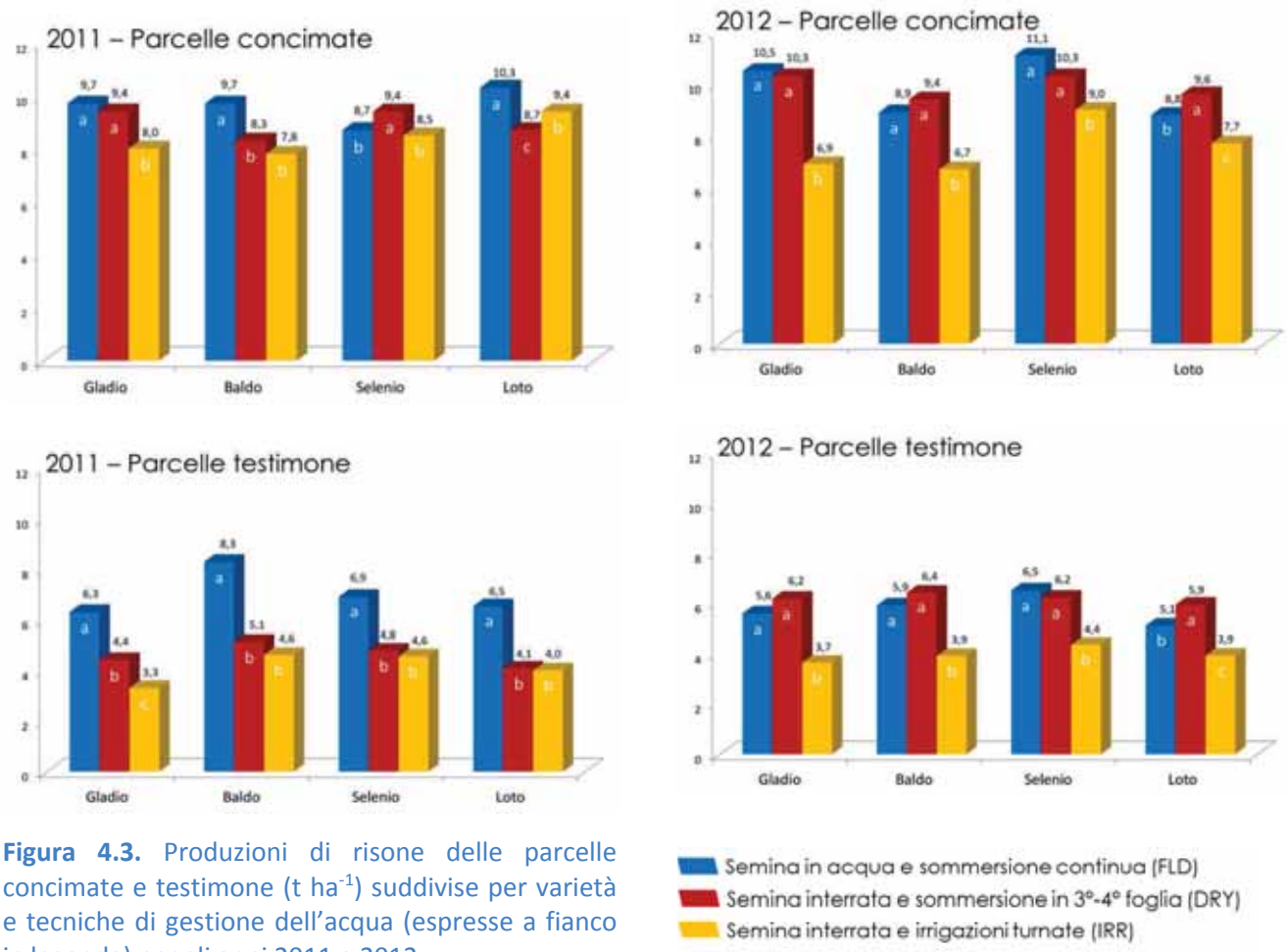


Figura 4.3. Produzioni di risone delle parcelle concimate e testimone (t ha^{-1}) suddivise per varietà e tecniche di gestione dell'acqua (espresse a fianco in legenda) per gli anni 2011 e 2012

In generale, per quanto riguarda il 2012, le maggiori produzioni raggiunte dai due trattamenti di semina in acqua (FLD) e di semina interrata e sommersione posticipata (DRY) sono da ricondurre alla più bassa sterilità riscontrata, rispetto ai valori elevati del 2011

L'elevata produzione registrata per la semina in acqua (10,5 t ha^{-1}) è stata influenzata dall'elevato valore di investimento finale (783 culmi m^{-2}), comunque inferiore rispetto a quello registrato l'anno precedente. Occorre sottolineare come tale densità finale di culmi per unità di superficie sia stata conseguita in funzione di un numero maggiore di germinelli affrancati e non in conseguenza della capacità di accestimento, che invece è stata dimostrato nel 2011. L'elevato rendimento produttivo della semina interrata e sommersione posticipata (10,3 t ha^{-1}), significativamente simile a quello ottenuto con la semina in acqua, è riconducibile ancora una volta al numero molto più elevato di spighette per pannocchia (146) rispetto a quello riscontrato nel trattamento in sommersione continua. Infine, i bassi risultati produttivi della tecnica delle irrigazioni turnate sono da porre in relazione ad un medio-basso investimento finale, non accompagnato da un incremento di spighette per pannocchia così come evidenziato dalla tecnica della sommersione posticipata (Tabella 4.1).

Baldo

Anche per la varietà Baldo i risultati produttivi 2011 sono stati influenzati dai valori di sterilità riscontrati per le tre tecniche analizzate. La più elevata produttività della semina in acqua (9,7 t ha^{-1}) è collegata, a parità di valori di investimento iniziale per le tre tecniche di gestione, al più alto investimento finale ottenuto da questo trattamento (475 culmi m^{-2}), ma in parte anche alla minore sterilità misurata (14,7%).

Nelle altre due tecniche è stato registrato un incremento del numero di spighette per pannocchia, che però non ha compensato le negative performance delle altre componenti della produzione.
Nel 2012 è stato osservato come i valori di investimento finale abbiano portato a evidenti variazioni dei risultati produttivi delle tre tecniche. L'aumento di resa unitaria riscontrato nella semina interrata e sommersione posticipata (9,4 t ha^{-1}) è riconducibile al più alto indice di accestimento (2,1) rispetto alle altre due tecniche esaminate, e all'elevato numero di spighette per pannocchia (124). La seconda annata sperimentale ha riportato un maggiore "gap" produttivo della tecnica in asciutta, che si è differenziata dalla semina interrata e sommersione posticipata per un minore indice di accestimento e per un ridotto numero di spighette per pannocchia (Tabella 4.2).

Selenio
Nel 2011 il Selenio ha risposto meglio delle altre varietà nei confronti della tecnica con semina interrata e sommersione posticipata (9,4ha^{-1}). I fattori che hanno determinato tale risultato sono stati l'elevato numero di spighette per pannocchia (106) e la minore presenza di spighette vuote (19,4%), rispetto alle altre due tecniche analizzate.
Benché la semina in acqua abbia ottenuto un risultato di investimento finale decisamente elevato (836 culmi m^{-2}), il basso numero di spighette per pannocchia (80) e l'elevata percentuale di sterilità (35,0%) hanno compromesso la performance produttiva di questa tecnica (8,7ha^{-1}).
Infine, il minore risultato produttivo della tecnica con irrigazioni turnate è da collegare ad una elevata sterilità (25,1%) e ad un minor investimento finale (599 culmi m^{-2}).
In generale, i risultati ottenuti nel 2012 hanno mostrato valori produttivi molto elevati per tutte le gestioni, con nessuna differenza significativa tra la semina in acqua e la sommersione posticipata. Anche in questo caso è stata verificata una maggior presenza di culmi per unità di superficie e un ridotto numero di spighette per pannocchia nella gestione con semina in acqua. Un altro dato favorevole a tale trattamento è riferibile al maggior peso dei 1000 semi, statisticamente superiore a quello misurato per la sommersione posticipata di circa 2 g. Anche il risultato della tesi con irrigazioni turnate è stato giudicato buono. Tuttavia la prestazione è stata penalizzata da una più elevata sterilità e da un ridotto investimento finale (Tabella 4.3).

Loto
La migliore performance produttiva raggiunta nel 2011 dalla semina in acqua (10,3 t ha^{-1}) è stata influenzata dal maggiore investimento finale (700 culmi m^{-2}), conseguito grazie ad un elevato indice di accestimento (1,5). Le due tecniche con sommersione posticipata e irrigazioni turnate hanno invece mostrato andamenti abbastanza simili delle diverse componenti della produzione, riportando un risultato produttivo inferiore per il trattamento con sommersione posticipata a seguito di una maggiore sterilità (19,9%).
Nel 2012 sono state registrate differenze statisticamente significative tra tutti i trattamenti. La maggiore produttività della semina interrata e sommersione posticipata è risultata essere in stretto rapporto con il numero di spighette per pannocchia, superiore di circa 20 unità rispetto alla semina in acqua e di circa 10 nei confronti della gestione con irrigazioni turnate (Tabella 4.4).

Tabella 4.1. Componenti della produzione della varietà Gladio, biennio 2011-2012

		Produzione		Peso 1000 semi		N. spighette/ pannocchia		Sterilità		Investimento iniziale		Investimento finale		Indice di accestimento	
		t ha^{-1}		*g*		*n°*		*%*		*culmi m^{-2}*		*culmi m^{-2}*			
2011	FLD	9,7	a	24,3		68	b	15,8	b	310		876	a	2,9	
	DRY	9,4	a	24,5		100	a	14,5	c	262		645	c	2,5	
	IRR	8,.0	b	24,1		75	b	20,2	a	368		768	b	2,2	
			**		n.s.		**		**		n.s.		**		n.s.
2012	FLD	10,5	a	24,5		76	c	8,8		400	a	783	a	2,0	
	DRY	10,3	a	25,1		146	a	7,7		170	b	480	b	2,8	
	IRR	6,9	b	24,6		120	b	8,3		196	b	512	b	2,7	
			**		n.s.		**		n.s.		**		**		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Tabella 4.2. Componenti della produzione della varietà Baldo, biennio 2011-2012

		Produzione		Peso 1000 semi		N. spighette/ pannocchia		Sterilità		Investimento iniziale		Investimento finale		Indice di accestimento	
		t ha^{-1}		*g*		*n°*		*%*		*culmi m^{-2}*		*culmi m^{-2}*			
2011	FLD	9,7	a	37,1		103	b	14,7	c	262		475	a	1,8	a
	DRY	8,3	b	37,7		115	a	29,5	a	268		358	b	1,3	b
	IRR	7,8	b	37,3		109	ab	20,4	b	272		357	b	1,3	b
			**		n.s.		*		**		n.s.		**		**
2012	FLD	8,9	a	43,3	a	106		5,4		233	a	369	a	1,6	
	DRY	9,4	a	40,2	b	124		6,1		135	b	270	b	2,1	
	IRR	6,7	b	41,3	b	114		3,5		141	b	210	c	1,5	
			**		**		n.s.		n.s.		**		**		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Tabella 4.3. Componenti della produzione della varietà Selenio, biennio 2011-2012

		Produzione		Peso 1000 semi		N. spighette/ pannocchia		Sterilità		Investimento iniziale		Investimento finale		Indice di accestimento	
		t ha^{-1}		*g*		*n°*		*%*		*culmi m^{-2}*		*culmi m^{-2}*			
2011	FLD	8,7	b	25,1		80	b	35,0	a	390		836	a	2,2	a
	DRY	9,4	a	24,7		106	a	19,4	c	385		724	b	2,0	ab
	IRR	8,5	b	24,7		102	a	25,1	b	414		599	c	1,5	b
			*		n.s.		*		**		n.s.		**		*
2012	FLD	11,1	a	26,1	a	93	c	7,3		350	a	654	a	1,9	b
	DRY	10,3	a	24,3	b	119	b	8,5		244	b	549	b	2,3	a
	IRR	9,0	b	25,7	a	128	a	11,0		259	b	492	b	1,9	b
			*		**		**		n.s.		**		*		*

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Tabella 4.4. Componenti della produzione della varietà Loto, biennio 2011-2012

		Produzione		Peso 1000 semi		N. spighette/ pannocchia		Sterilità		Investimento iniziale		Investimento finale		Indice di accestimento	
		t ha^{-1}		*g*		*n°*		*%*		*culmi m^{-2}*		*culmi m^{-2}*			
2011	FLD	10,3	a	34,5		80		16,8	ab	460		700	a	1,5	
	DRY	8,7	c	34,8		88		19,9	a	420		520	b	1,3	
	IRR	9,4	b	34,5		84		14,1	b	436		484	b	1,1	
			**		n.s.		n.s.		*		n.s.		**		n.s.
2012	FLD	8,8	b	36,8		79	c	7,2	a	307		514	a	1,7	
	DRY	9,6	a	35,6		99	a	6,9	a	240		444	b	1,9	
	IRR	7,7	c	36,2		91	b	4,9	b	285		448	b	1,6	
			**		n.s.		**		*		n.s.		**		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

4.1.2 Qualità merceologica

Come nel caso delle componenti della produzione, per descrivere al meglio i risultati qualitativi, vengono riportate qui di seguito le performance relative ad ogni singola varietà ottenute nel corso del biennio indagato dalle tesi che hanno previsto l'apporto di fertilizzante azotato.

Gladio

I risultati relativi alle rese (globale e in grani interi) nel 2011 non hanno mostrato differenze significative tra le tre differenti tecniche di gestione dell'acqua. Nel 2012, invece, i due trattamenti con semina interrata hanno ottenuto una resa globale leggermente superiore alla semina in acqua. Per quanto concerne la resa in grani interi, solo la sommersione posticipata si è differenziata significativamente. La percentuale di granelli gessati è rimasta costante nel corso dei due anni per tutte e tre le tecniche, con valori molto bassi e non significativamente differenti tra loro.

Al contrario, la percentuale di granelli danneggiati ha subito un decremento, presentando valori minori nel 2012 rispetto all'annata precedente. Nel primo anno di sperimentazione la semina in acqua e la tecnica con

irrigazioni turnate hanno mostrato il maggior numero di granelli danneggiati (rispettivamente pari a 2,5 e 2,7%) (Tabella4.5).

Tabella 4.5. Qualità merceologica della varietà Gladio, biennio 2011-2012

		Resa globale		Resa grani interi		Granelli gessati		Granelli danneggiati	
		%		%		%		%	
2011	FLD	70,5		65,3		1,2		2,5	a
	DRY	70,8		65,9		1,0		1,8	b
	IRR	70,9		65,8		0,8		2,7	a
			n.s.		n.s.		n.s.		*
2012	FLD	70,0	b	63,0	b	1,2		0,8	
	DRY	70,9	a	64,6	a	1,1		1,1	
	IRR	71,1	a	63,1	b	0,7		0,8	
			**		**		n.s.		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Baldo

Nel 2011 le tre tecniche di gestione dell'acqua non hanno mostrato differenze significative in termini di resa globale, ma maggiori divari sono stati evidenziati per quanto riguarda la resa in grani interi. In questo caso, la semina in acqua si è dimostrata la tecnica migliore, ottenendo una resa del 65,7%, seguita dalla semina interrata e sommersione posticipata, con 64,2%. Minore risultato è stato ottenuto dalle irrigazioni turnate (61,8%).

Nel 2012 si è assistito ad un leggero incremento del dato di resa globale, con risultati che hanno oscillato tra 73,0% (IRR) e 73,9% (FLD). Diversamente, la resa in grani interi è risultata decisamente inferiore, con valori che hanno variato dal minore risultato della semina in acqua (46,6%) al migliore della semina interrata e sommersione posticipata (53,8%).

La percentuale di granelli gessati ha mostrato un'evidente correlazione negativa con la produttività. In entrambe le annate i valori più elevati sono stati ottenuti dalla semina in acqua e dalla sommersione posticipata.

Infine, per quanto riguarda i granelli danneggiati, nel 2011 la sommersione continua è risultata la tecnica con il minore dato percentuale (1,8%), mentre le altre due tecniche hanno mostrato risultati maggiori e simili tra loro. Nel secondo anno di sperimentazione i risultati hanno confermato l'andamento ottenuto nell'anno precedente, ad eccezione della tecnica con irrigazioni turnate che ha mostrato un decremento nella percentuale di granelli danneggiati, passando dal 2,5% del 2011 al 1,3% del 2012 (Tabella 4.6).

Tabella 4.6. Qualità merceologica della varietà Baldo, biennio 2011-2012

		Resa globale		Resa grani interi		Granelli gessati		Granelli danneggiati	
		%		%		%		%	
2011	FLD	72,0		65,7	a	2,1	a	1,8	
	DRY	72,6		64,2	ab	1,7	a	2,6	
	IRR	73,2		61,8	b	0,9	b	2,5	
			n.s.		*		**		n.s.
2012	FLD	73,0	b	46,6		2,1	a	1,8	b
	DRY	73,3	ab	53,8		2,7	a	2,5	a
	IRR	73,7	a	51,3		0,6	b	1,3	b
			*		n.s.		**		**

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Selenio

Nel caso del Selenio le tre tecniche di gestione dell'acqua hanno mostrato risultati di resa globale e in grani interi costanti nel corso del biennio, con valori pressoché paragonabili tra loro.

Nel 2011 la tecnica della semina interrata e sommersione posticipata ha mostrato la maggior presenza di granelli gessati (2,6%); risultati minori sono stati ottenuti invece nel caso della semina in acqua (1,3%) e delle irrigazioni turnate (1,0%). Questo andamento è stato confermato dai risulti ottenuti nel 2012, con un leggero incremento dei valori in tutte e tre le tecniche.

Relativamente alla percentuale di granelli danneggiati, il 2011 ha riportato valori molto elevati in tutte e tre le tecniche di gestione, con il peggiore risultato espresso dalla semina in acqua (13,3%). L'anno successivo è stata riscontrata una notevole riduzione nella percentuale di granelli danneggiati, con risultati simili tra le gestioni irrigue e pari a 2,5% circa (*Tabella 4.7*).

Tabella 4.7. Qualità merceologica della varietà Selenio, biennio 2011-2012

		Resa globale		Resa grani interi		Granelli gessati		Granelli danneggiati	
		%		%		%		%	
2011	FLD	72,2		68,0		1,3	ab	13,3	a
	DRY	72,5		65,7		2,6	a	8,8	b
	IRR	72,6		67,8		1,0	b	9,7	b
			n.s.		n.s.		n.s.		*
2012	FLD	72,2	b	67,1		2,1		2,5	
	DRY	72,0	b	65,3		3,2		2,5	
	IRR	73,2	a	66,5		1,6		2,2	
			**		n.s.		n.s.		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Loto

Il Loto ha espresso risultati di resa globale simili, seppur significativamente differenti, tra le diverse tecniche di gestione analizzate, con il migliore risultato ottenuto dall'irrigazione turnata in entrambe le annate considerate (72,5 e 72,4% rispettivamente nel 2011 e nel 2012). Per quanto riguarda la resa in grani interi, solo nel 2012 sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra le tesi, con il risultato più basso per la semina in acqua.

Considerando i difetti, nel 2011 la semina in acqua si è inoltre dimostrata essere la tecnica con la maggior presenza di granelli gessati (5,3%), mentre nel 2012 si è assistito ad un leggero decremento percentuale, arrivando al valore di 4,5%, significativamente simile al risultato raggiunto dalla sommersione posticipata (4,8%).Contrariamente all'andamento dei granelli gessati, la percentuale di cariossidi danneggiate è stata inferiore nella semina in acqua per entrambe le stagioni colturali (Tabella 4.8).

Tabella 4.8. Qualità merceologica della varietà Loto, biennio 2011-2012

		Resa globale		Resa grani interi		Granelli gessati		Granelli danneggiati	
		%		%		%		%	
2011	FLD	71,6	b	64,6		5,3	a	4,2	
	DRY	71,5	b	59,9		3,2	b	5,3	
	IRR	72,5	a	62,7		3,8	b	6,0	
			*		n.s.		*		n.s.
2012	FLD	71,5	b	51,1	b	4,5	a	1,6	
	DRY	71,3	b	58,6	a	4,8	a	2,4	
	IRR	72,4	a	56,8	a	2,4	b	2,1	
			*		*		**		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

4.1.3 Flora infestante

L'incidenza della flora infestante è risultata di maggiore entità nel 2011, con rilevante presenza di *Ammanniacoccinea*Rottb.La sua densità è stata superiore nel trattamento con sole irrigazioni, ma comunque presente in grandi quantità anche nella semina interrata e sommersione posticipata. Nonostante un migliore adattamento alle condizioni di sommersione, nella gestione in asciutta le frequenti irrigazioni hanno permesso la germinazione e la crescita di questa specie, che viene comunemente definita ad habitus anfibio. Le altre malerbe più diffuse sono state:*Heterantherareniformis* Ruiz et. Pav., rilevata solo nel trattamento con semina in acqua, *Cyperusdifformis* L. e *Linderniadubia* (L.)Pennell, presenti quasi in egual misura nei tre diversi trattamenti. Il giavone (*Echinochloacrus-galli*(L.)P.Beauv.) è stato osservato solo nelle semine interrate, con un livello di circa 5 piante m^{-2}.

Nel 2012 la flora infestante, presente in minore densità, ha visto aumentare la sua incidenza intermini di diversità. Rilevante è stata la presenza di *Abutilon theophrasti*Medik. e *Echinochloacrus-galli* (L.)P.Beauv. nel trattamento con irrigazioni turnate, mentre la semina in acqua ha favorito la diffusione di *Ammanniacoccinea*, *Heterantherareniformis* e *Scirpusmucronatus* (L.)Palla (Figura 4.4).

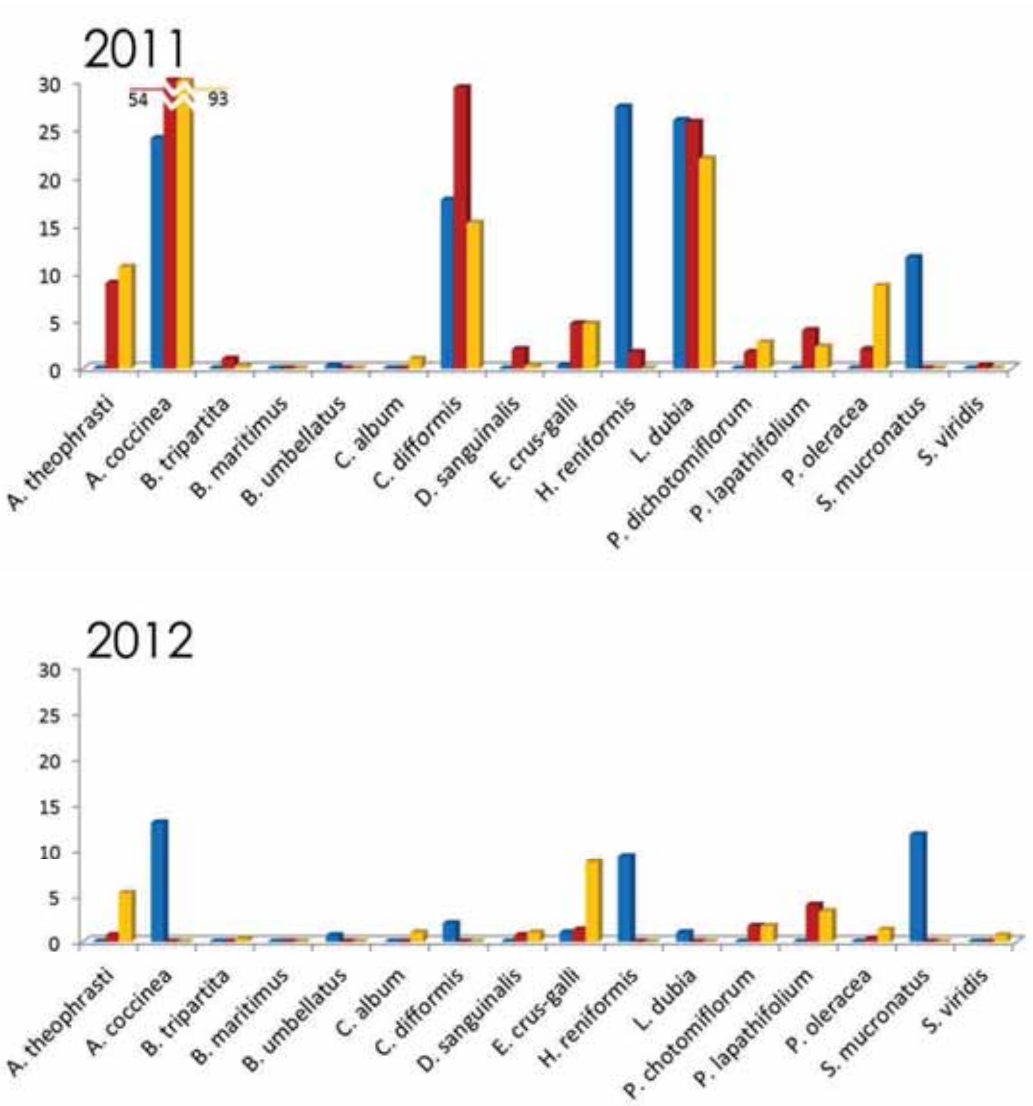
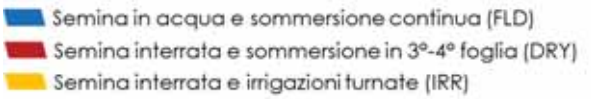


Figura 4.4. Specie infestanti rilevate nelle aree testimone di ciascuna delle tre tecniche di gestione dell'acqua indagate (espresse a fianco in legenda) per gli anni 2011 e 2012 e relativo valore di densità (n° di piante m^{-2})



4.1.4 Piriculariosi e presenza di *Lissorhoptrus oryzophilus*K.

Scarsa è stata la presenza di larve *Lissorhoptrusoryzophilus*K.in entrambe le annate. Sono da segnalare modesti ritrovamenti di larve solo nella semina in acqua del 2011, in tutte le varietà ad eccezione del Selenio (Tabella 4.9).

La pressione della Piriculariosi è stata decisamente più elevata nel 2011.

In conseguenza della disponibilità di sole due ripetizioni per ogni varietà e gestione irrigua e di una certa variabilità nei risultati, l'analisi della varianza ha espresso limitate differenze significative tra le tesi. Tuttavia, alcune tendenze nell'incidenza della malattia sono state confermate nel biennio di sperimentazione.

La gestione con semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia ha espresso la minore percentuale di culmi colpiti per le varietà Selenio e Loto. Gladio si è dimostrato molto suscettibile quando coltivato con irrigazioni turnate (7,5), mentre, al contrario, l'adozione della tecnica in asciutta ha conferito una buona resistenza a Baldo (0,5).

Nel secondo anno di sperimentazione, sebbene con valori assoluti inferiori, sono stati confermati i risultati 2011 nel caso di Gladio e Baldo, mentre non sono state riscontrate differenze tra le tesi per Loto e Selenio. Quest'ultimo genotipo, nel 2012, non è stato interessato da infezioni del fungo (Tabella 4.10).

Tabella 4.9. Presenza di larve di *Lissorhoptrusoryzophilus*K.,biennio 2011-2012

		Gladio	Baldo	Selenio	Loto
2011	FLD	0,7	0,3	-	0,3
	DRY	0,3	-	0,2	-
	IRR	-	-	-	-
2012	FLD	-	0,3	-	-
	DRY	-	-	-	-
	IRR	-	-	0,3	-

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

Tabella 4.10. Incidenza di Piricularioso, biennio 2011-2012

		Gladio		Baldo		Selenio		Loto	
2011	FLD	4,0		3,5		6,5	a	6,8	
	DRY	5,3		2,8		2,8	b	0,3	
	IRR	7,5		0,5		5,3	a	4,3	
			n.s.		n.s.		*		n.s.
2012	FLD	0,4	b	0,9		0,1		2,0	
	DRY	0,7	b	1,4		0,0		2,3	
	IRR	4,0	a	0,1		0,2		2,3	
			*		n.s.		n.s.		n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

4.1.5 Efficienza d'uso dell'azoto

I valori di efficienza d'uso dell'azoto sono stati molto buoni in entrambe le annate di sperimentazione e superiori nel 2011. Sono state osservate differenze significative tra le tesi solo per Gladio, nella prima stagione colturale. Come espresso da una tendenza generale del biennio, le più basse percentuali di recupero dell'azoto sono state registrate in semina in acqua. A tale andamento, vi è stato uno scostamento del risultato ottenuto dal Gladio nel 2012, dove il valore più basso è stato riportato dalla gestione con irrigazioni turnate (Tabella 4.11).

Tabella 4.11. Efficienza d'uso dell'azoto (in %) delle quattro varietà applicate alle tre tecniche di gestione dell'acqua

		Gladio		Baldo	Selenio	Loto
2011	FLD	40,5	b	52,8	54,5	54,9
	DRY	53,8	a	78,5	61,0	62,6
	IRR	61,2	a	61,9	60,9	57,3
		*		n.s.	n.s.	n.s.
2012	FLD	52,7		37,0	55,6	51,0
	DRY	56,5		48,7	65,7	57,9
	IRR	39,8		42,8	64,3	55,6
		n.s.		n.s.	n.s.	n.s.

** P<0,05*
*** P<0,01*
FLD: Semina in acqua e sommersione continua
DRY: Semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia
IRR: Semina interrata e irrigazioni turnate

4.1.6 Monitoraggio sul contenuto di azoto nelle acque superficiali e profonde

Nel 2011 l'analisi delle acque è stata condizionata, per quanto riguarda i primi campioni della stagione, dalla presenza di una quota di azoto nitrico nel concime ternario utilizzato in pre-semina.

Per quanto riguarda le acque superficiali (Figura 4.5), le quantità di ammonio determinate nelle acque in uscita sono state prossime a 0 mg N L^{-1}, ad eccezione dei due campionamenti successivi alle concimazioni in copertura ed agli interventi irrigui nella gestione ad irrigazioni turnate. Le prime acque in uscita dalle parcelle gestite in sommersione hanno mostrato valori prossimi a 0,5 mg N L^{-1}, comunque inferiori al livello riscontrato all'entrata durante la sommersione iniziale (1,3 mg N L^{-1}).

I dati relativi ai nitrati riportano concentrazioni di un certo rilievo nella fase iniziale del ciclo colturale, quando solo le parcelle in sommersione erano irrigate. Nonostante l'apporto di nitrato con il concime, la quantità di azoto nelle acque in uscita si è attestata sui livelli in entrata.

Passando all'analisi della soluzione circolante, campionata tramite l'ausilio delle coppe porose disposte nelle camere sperimentali, i risultati mostrano differenze più marcate tra le tre tecniche a confronto (Figura 4.6).

Nella semina in acqua, l'ammonio ha evidenziato concentrazioni dell'ordine di 1 mg N L^{-1} sino alla metà di giugno, per tutte le profondità di campionamento. Successivamente, è stato raggiunto un picco di 3 mg N L^{-1} alla profondità di 25 cm, in seguito alla concimazione in accestimento. In luglio i valori dello ione ammoniacale hanno riportato un andamento irregolare, mostrando risultati superiori nei lisimetri posizionati a 75 cm, rispetto a quelli più superficiali. Le concentrazioni si sono poi azzerate a partire dalla metà di agosto. Nella semina interrata seguita da sommersione sono stati riportati leggeri incrementi di ammonio successivamente alla concimazione in pre-sommersione (fase di accestimento), mentre con le irrigazioni turnate, valori superiori a 1 mg N L^{-1} sono stati registrati successivamente alla concimazione in pre-semina e, solo alla profondità di 50 cm, dopo la somministrazione azotata in differenziazione della pannocchia.

Le concentrazioni di azoto nitrico sono state elevatissime nei campionamenti iniziali delle gestioni in semina interrata, a causa delle condizioni favorevoli alla nitrificazione, oltre che per la quota distribuita con il fertilizzante. I valori sono stati decisamente più bassi in condizione di sommersione. In tale situazione la protezione dell'ammonio dall'attività nitrificante e l'effetto di diluizione e dilavamento esercitato dall'acqua di sommersione sono stati gli elementi determinanti ad assicurare un limitato contenuto di nitrato nella

soluzione circolante. Per tutta la restante parte del ciclo colturale non sono stati osservati livelli degni di nota.

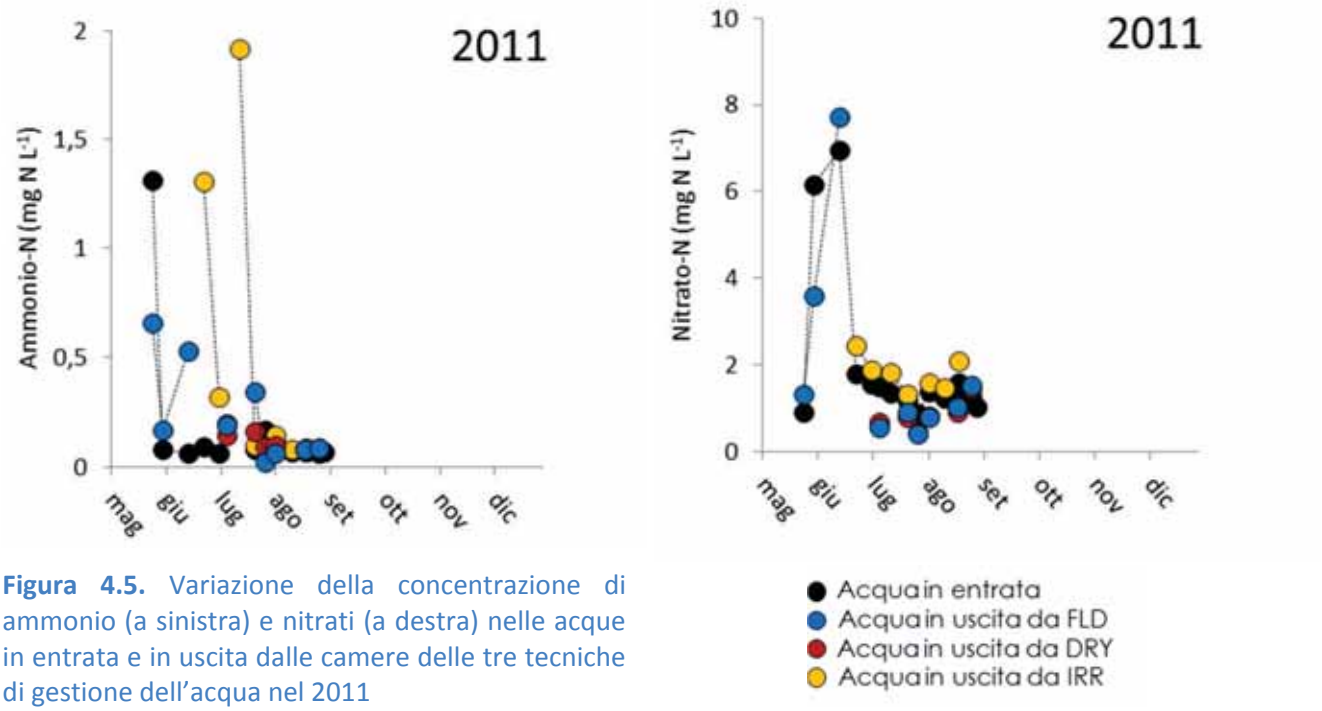


Figura 4.5. Variazione della concentrazione di ammonio (a sinistra) e nitrati (a destra) nelle acque in entrata e in uscita dalle camere delle tre tecniche di gestione dell'acqua nel 2011

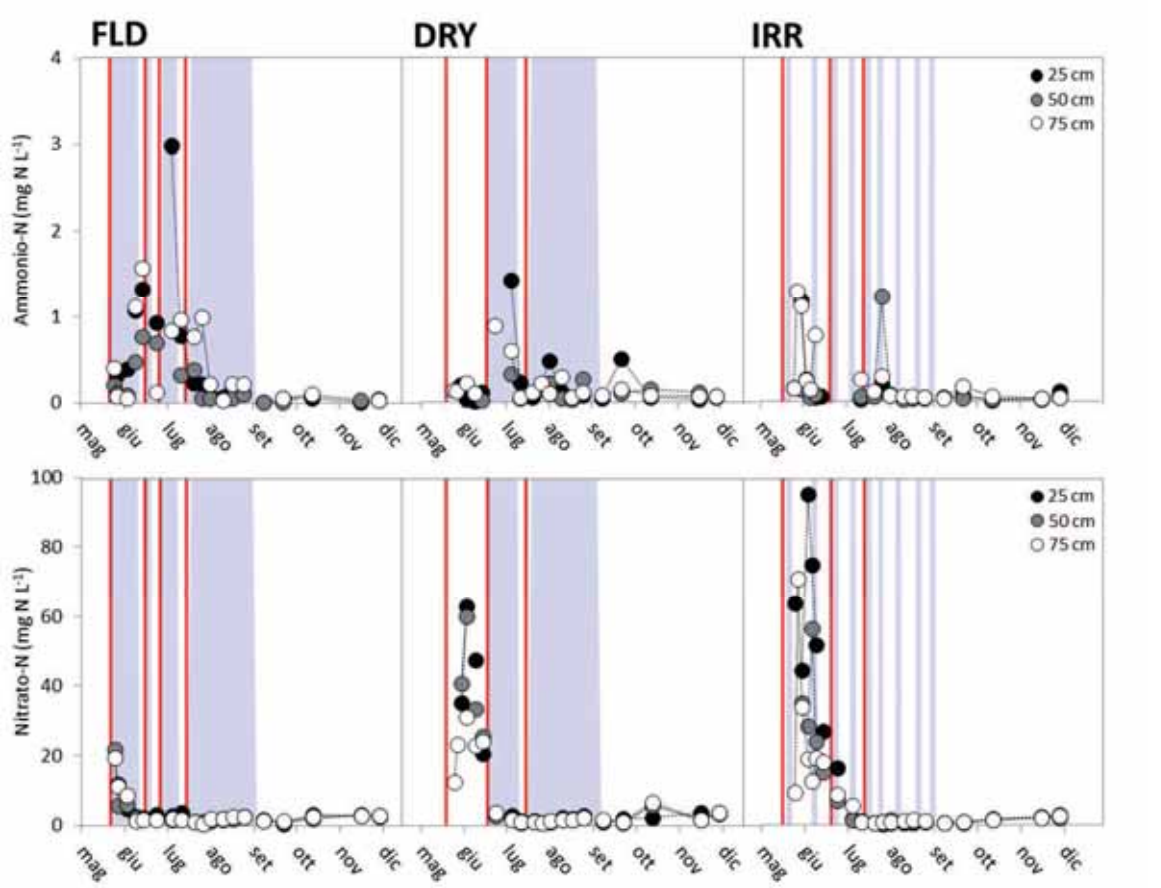


Figura 4.6. Variazione della concentrazione di ammonio e nitrati nelle acque alle tre profondità di campionamento delle tre tecniche di gestione dell'acqua nel 2011

Nel corso della campagna 2012, oltre al campionamento delle acque è stato effettuato un intenso monitoraggio dei valori di Eh e pH dei suoli (mediante elettrodi posti in ciascuna camera), al fine di disporre di un quadro preciso della variazione delle condizioni elettrochimiche dei suoli per ciascuna tecnica di gestione dell'acqua. Tali variazioni sono direttamente relazionabili ai processi chimici e biologici responsabili delle trasformazioni dell'azoto nell'agroambiente.
Nei grafici riportati in Figura 4.7 si può osservare come con l'istaurarsi delle condizioni di sommersione vi sia un abbassamento del valore di Eh dei suoli, arrivando a misurare valori decisamente negativi (fino a -400 mV) nel momento di massima saturazione idrica dei trattamenti con semina in acqua (FLD) e semina interrata e sommersione posticipata (DRY). Nelle condizioni di aerobiosi, tipiche del trattamento con irrigazioni turnate (IRR), i valori riscontrati sono stati sempre ampiamente positivi, con picchi più bassi in corrispondenza dei momenti di irrigazione.
Anche i dati di pH hanno mostrato delle variazioni in corrispondenza del periodo di sommersione, con un innalzamento dei valori in FLD e DRY, arrivando a stabilizzarsi a 6,5 nel momento di massima saturazione idrica dei due trattamenti.

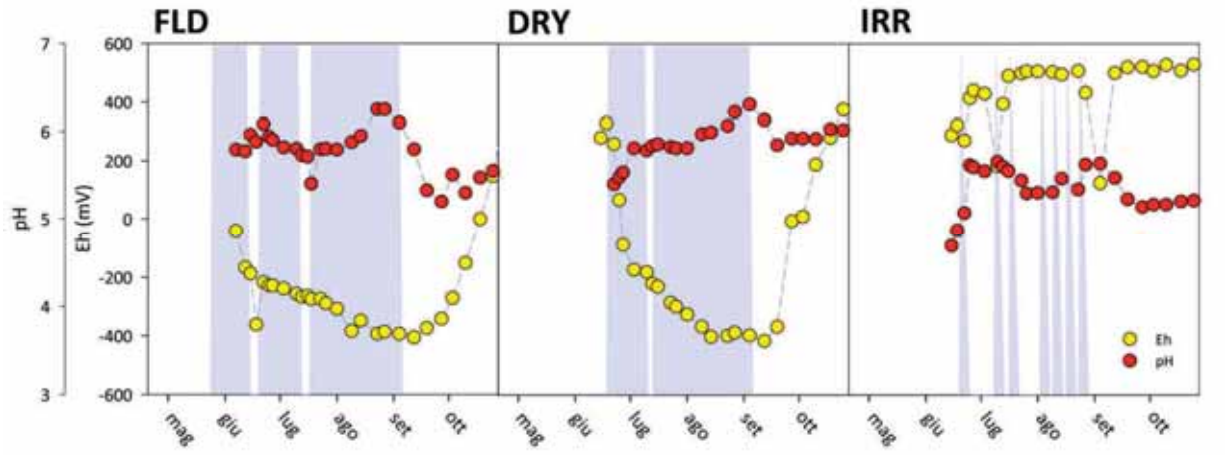


Figura 4.7. Variazione dei valori di Eh e pH nei suoli delle tre tecniche di gestione dell'acqua

Periodo di sommersione/irrigazione delle camere

Per quanto riguarda l'analisi delle acque superficiali in entrata(Figura4.8) sono state registrate basse concentrazioni di ammonio, mentre in quelle di uscita dalle camere le concentrazioni sono risultante leggermente superiori all'ingresso solo in corrispondenza degli interventi fertilizzanti. I risultati più elevati sono stati rinvenuti nel periodo della sommersione iniziale nella semina in acqua e successivamente alla sommersione della semina interrata, precedute entrambe dai maggiori interventi azotati. I valori di nitrato nelle acque in uscita sono paragonabili a quelle in entrata, ad eccezione del campionamento successivo alla sommersione nella semina in acqua o ad alcuni interventi di irrigazione nella semina interrata. Il livello di nitrato più elevato è stato però osservato nell'acqua in entrata a fine maggio (>8 mg N L^{-1}), senza però essere seguito da un innalzamento dei valori in uscita: ne deriva una possibile funzione depurante della risaia.

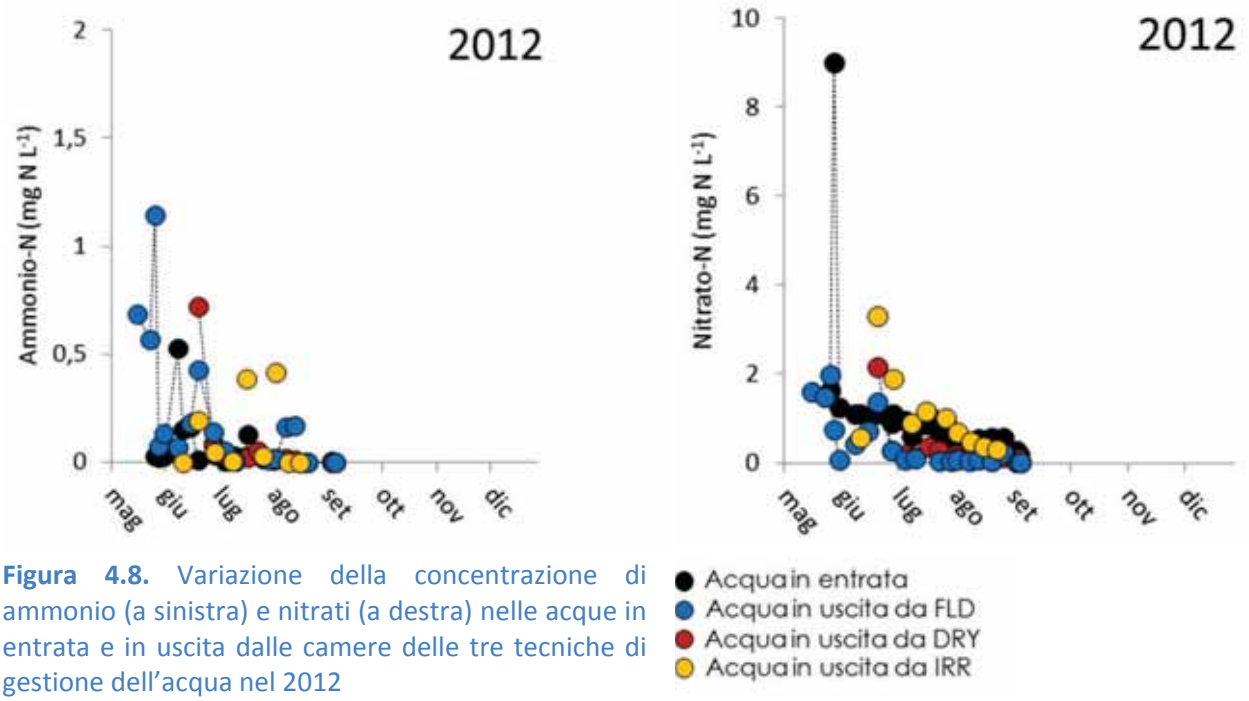


Figura 4.8. Variazione della concentrazione di ammonio (a sinistra) e nitrati (a destra) nelle acque in entrata e in uscita dalle camere delle tre tecniche di gestione dell'acqua nel 2012

Le coppe porose (Figura 4.9) evidenziano un modesto incremento delle concentrazioni di ammonio nelle parcelle in sommersione dopo la concimazione di pre-semina. Tale incremento è stato maggiore nella semina interrata, probabilmente per la mancata diluizione data dalla non sommersione. Dopo la prima concimazione in copertura, all'instaurazione del regime di sommersione, nelle coppe superficiali in semina interrata e sommersione in 3°-4° foglia sono state misurate concentrazioni maggiori a 4 mg N L^{-1}. Il trattamento in asciutta ha presentato un trend simile, ma con concentrazioni più basse, a causa della minore quantità di fertilizzante apportata e per l'effetto dei cicli di irrigazione/drenaggio. È importante sottolineare come nella semina in acqua non vi siano stati incrementi di ammonio in seguito alla concimazione in accestimento. In tutte le gestioni irrigue la seconda parte del ciclo colturale ha evidenziato valori di ammonio prossimi 0mg N L^{-1}. Le concentrazioni di nitrati testimoniano una limitata nitrificazione in condizioni di sommersione continua, con valori più alti prima degli interventi fertilizzanti e della sommersione iniziale. La semina interrata e l'asciutta mostrano invece due picchi successivi ai primi due interventi fertilizzanti, con valori superiori a 30 e a 46 mg N L^{-1} nelle parcelle in aerobiosi. In corrispondenza delle concimazione in pre-semina ed in accestimento il nitrato ha riportano incrementi anche nelle coppe a 50 e 75 cm.

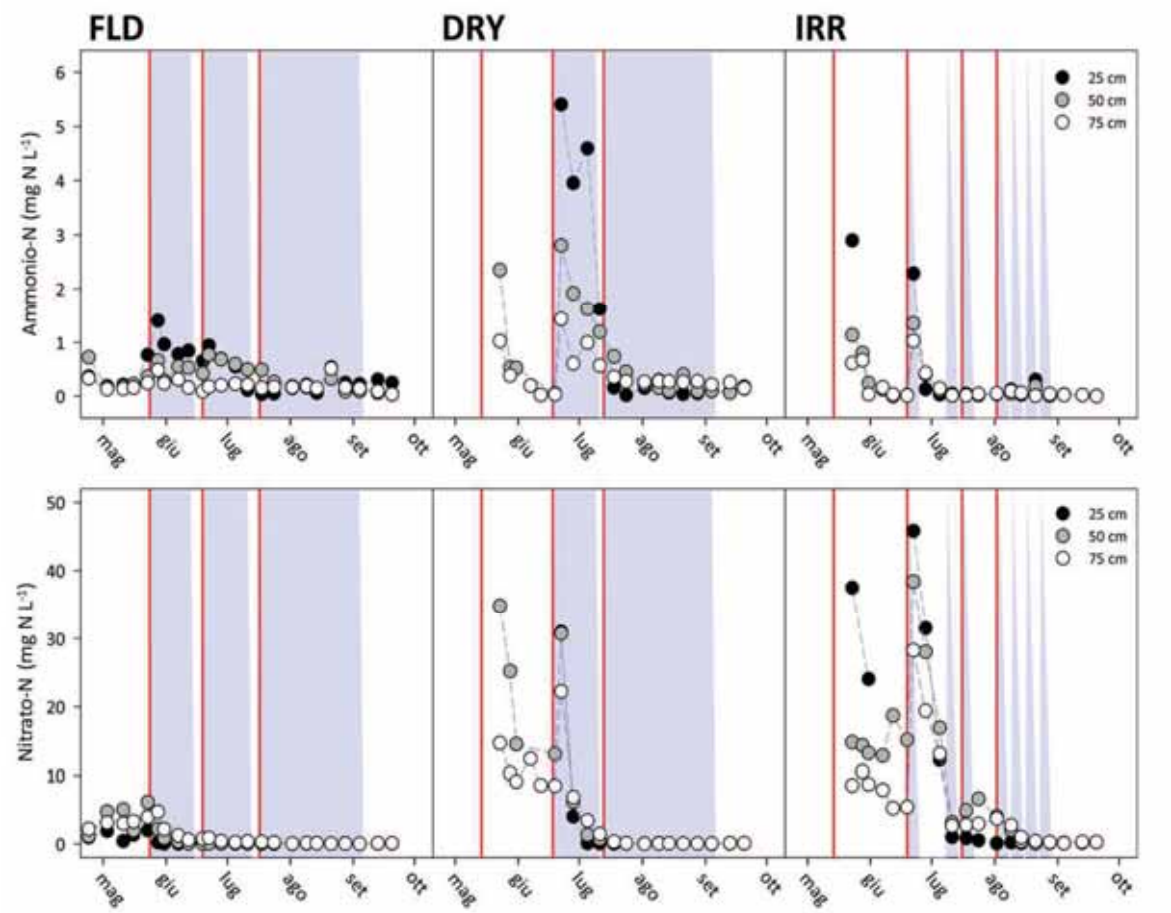


Figura 4.9. Variazione della concentrazione di ammonio e nitrati nelle acque alle tre profondità di campionamento delle tre tecniche di gestione dell'acqua nel 2012.

4.1.7 Produzione e fattori della produzione (sito CRA-RIS di Vercelli)

Le attività svolte da CRA-RIS hanno permesso di verificare le performance agronomiche e qualitative di 9 varietà di riso coltivate in condizioni di semina interrata con sommersione continua a partire da inizio accestimento (DRY) a confronto con le stesse coltivate in condizioni semina interrata con irrigazione turnata (IRR).

La ridotta disponibilità idrica ha causato una riduzione sul rendimento medio, con un decremento della produzione nella condizione IRR che si è attestato sul 50% nel 2011 e sul 14% nel 2012. La situazione è stata esacerbata dai forti attacchi di brusone (e mal del collo) che si sono verificati nelle condizioni IRR, soprattutto nel 2011; i valori medi di indice della malattia sono risultati pari a 6 e 1 nel caso rispettivamente della coltivazione IRR e della coltivazione DRY. Solo la varietà Salvo, conosciuta come portatrice di resistenze al brusone, ha limitato il divario produttivo tra le due condizioni nel 2011, come si osserva in Figura 4.10.Trascurando i dati produttivi registrati nel 2011, nel 2012 le varietà Centauro, Loto, Roma, Salvo e Selenio hanno dimostrato di possedere un potenziale produttivo elevato superando la media di campo nella prova in condizioni IRR.

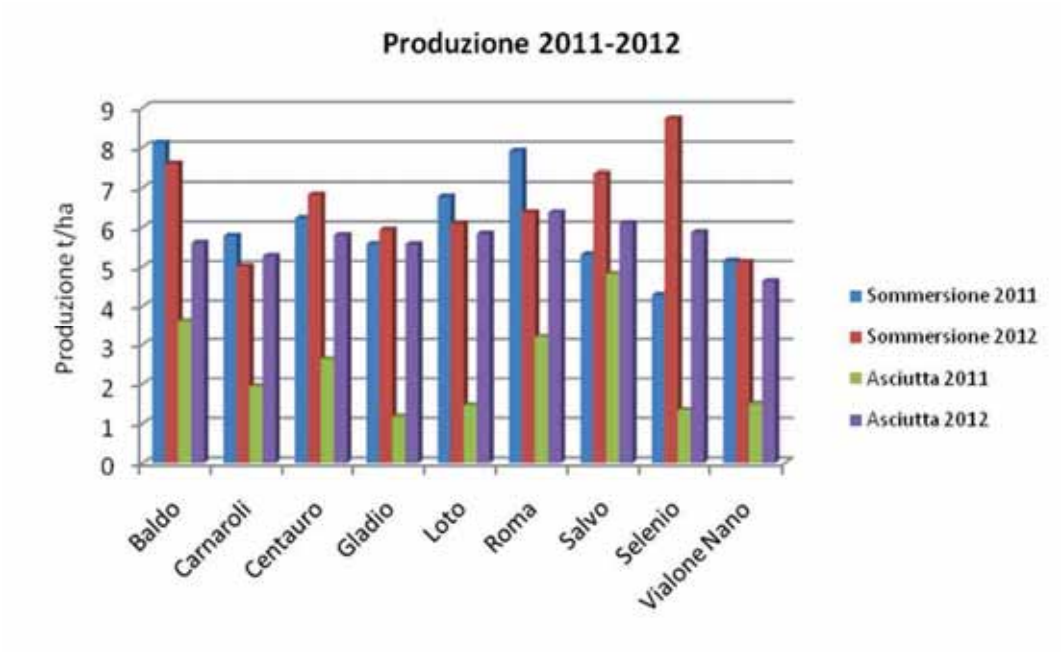


Figura 4.10. Valori produttivi medi delle nove varietà di riso ottenuti per le condizioni DR e IRR negli anni 2011 e 2012

E' possibile riscontrare tale tendenza anche sui caratteri qualitativi, come la resa in grani interi, caratteristica per la quale le varietà Centauro, Roma, Selenio e Salvo hanno fatto rilevare valori superiori alla media di campo per le prove in condizioni di IRR di entrambe le annate di sperimentazione (Figura 4.11). Sebbene il comportamento generale osservato è una riduzione delle rese nel caso di tale gestione irrigua della risaia, le varietà Salvo e Selenio risultano essere quelle che divario minimo tra le rese delle due tecniche di coltivazione a confronto.

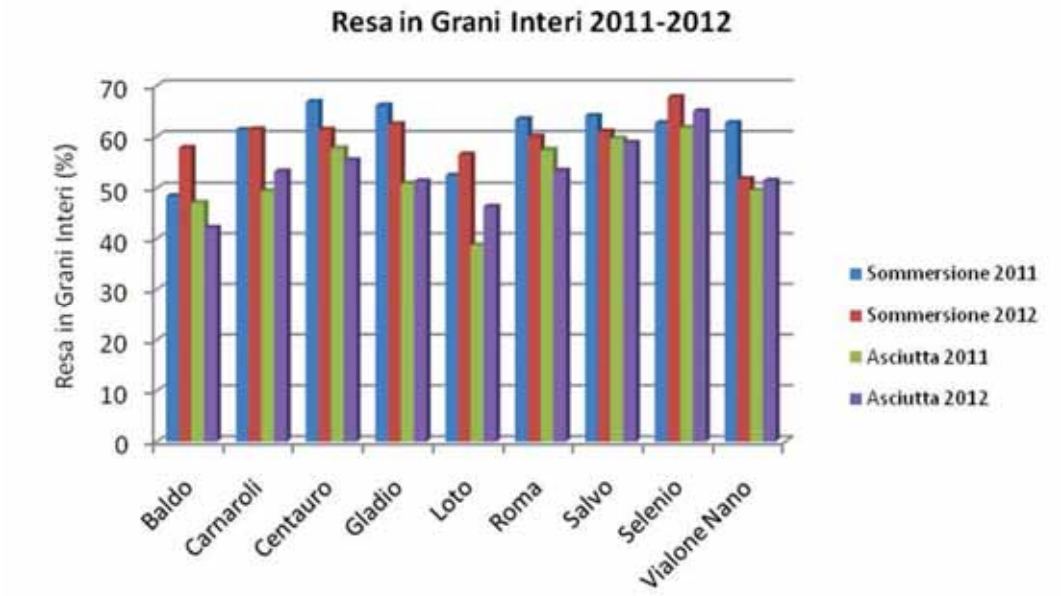


Figura 4.11. Valori medi delle rese in grani interi per le nove varietà di riso nelle condizioni DRY e IRR negli anni 2011 e 2012

Valutazioni morfo-fenologiche hanno permesso di constatare che la durata del ciclo colturale (giorni trascorsi tra la semina e la maturazione) non è sostanzialmente diversa tra le due tecniche di gestione idrica seppur per tutte le varietà un ritardo massimo di 2 o 3 giorni è riscontrabile nel caso della condizione IRR

rispetto alla DRY. Si osserva invece una diminuzione generalizzata della altezza della pianta nelle condizioni IRR, con valori medi di riduzione delle altezze del 35% e 17% rispettivamente per le annate 2011 e 2012 (Figura 4.12) con un decremento massimo osservato di circa il 40% per il Vialone Nano nella annata 2011.

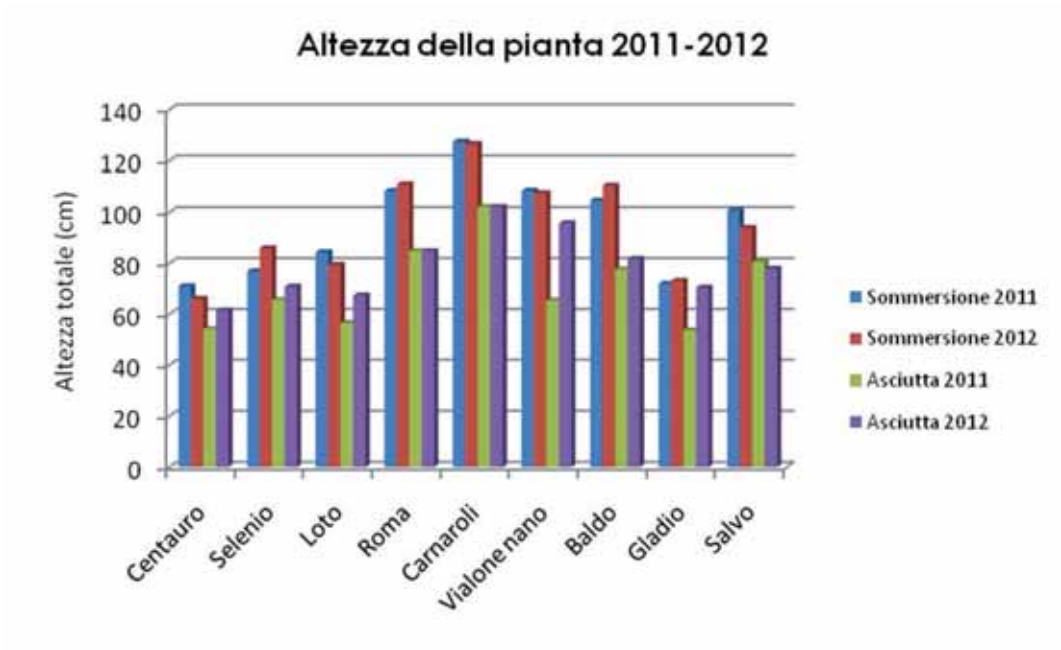


Figura 4.12. Valori medi dell'altezza delle piante per le nove varietà di riso nelle condizioni di sommersione ed asciutta per negli anni 2011 e 2012

Anche il parametro dei grani macchiati è stato anch'esso influenzato dalla gestione idrica, con incrementi dei valori del 60% circa nel 2011 ed anche superiori nel 2012 (Figura 4.13), indicando che per questo parametro le varietà testate sono poco adattate alle condizioni di coltivazione IRR.

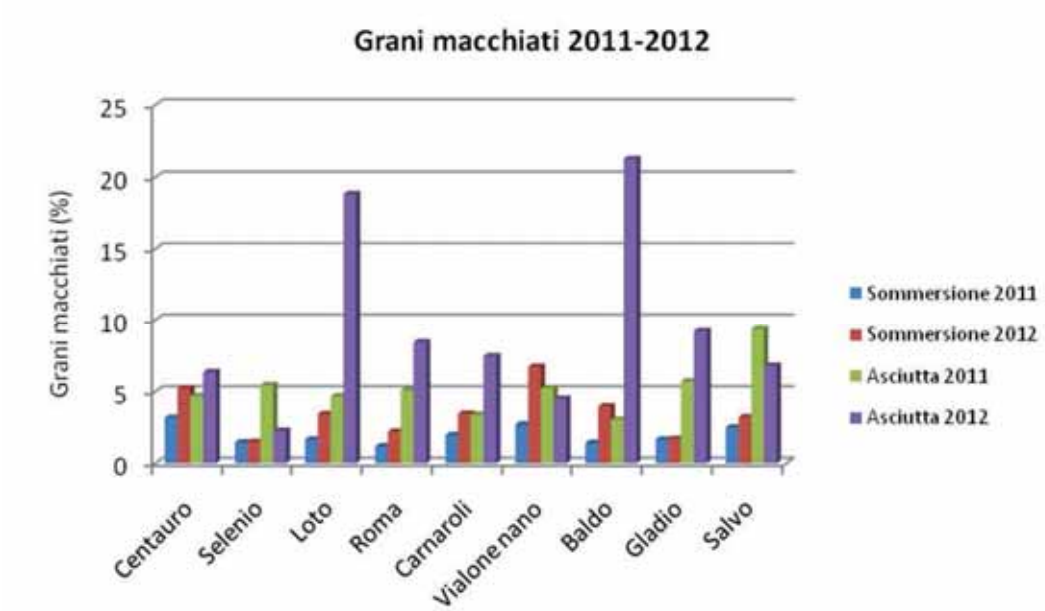


Figura 4.13. Valori medi dei grani macchiati per le nove varietà di riso nelle condizioni di sommersione ed asciutta per gli anni 2011 e 2012

Parametri che influenzano la produzione, come sterilità, allettamento e numero di culmi fertili, a parte rare eccezioni, non sono stati significativamente influenzati dalle due diverse tecniche di somministrazione

idrica.

Il valore di concentrazione proteica nel 2011 è risultato superiore per tutte le varietà nella condizione di asciutta, probabilmente a causa della formazione di granelli più piccoli che determinano un aumento del contenuto in proteine rispetto alla matrice amilacea. Nel 2012 si è invece osservato un decremento pari circa all'8% nella condizione IRR (Figura 4.14). La coltivazione aerobica determina infine una riduzione media di un punto percentuale del contenuto di amilosio nel 2011, mentre nel 2012 la diminuzione è davvero minima, in alcuni casi (Gladio) il valore di amilosio in asciutta supera di poco il valore nella condizione di sommersa (Figura 4.15).

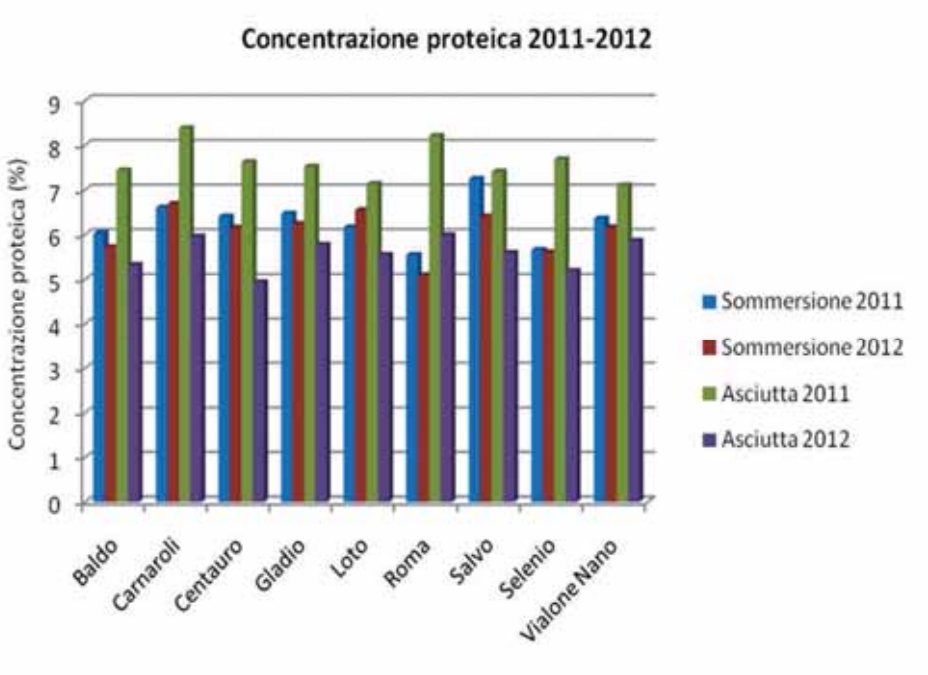


Figura 4.14. Valori medi della concentrazione proteica del riso lavorato per le nove varietà nelle condizioni di sommersione ed asciutta negli anni 2011 e 2012

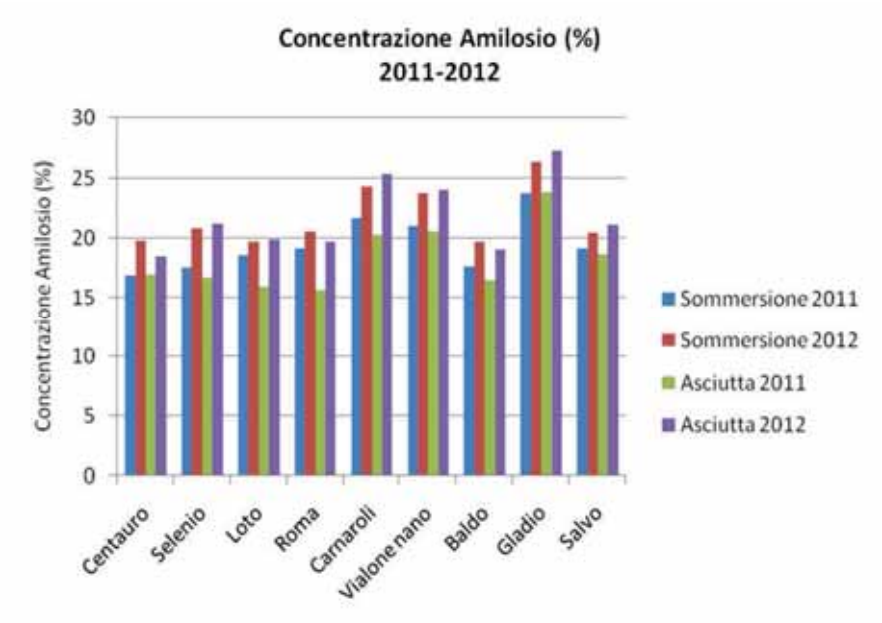


Figura 4.15. Valori medi della concentrazione in amilosio del riso lavorato per le nove varietà nelle condizioni di sommersione ed asciutta negli anni 2011 e 2012

4.2 Gestione ed efficienza di uso dell'acqua in campo

Nel corso del progetto si è proceduto al monitoraggio in campo dei flussi e degli invasi idrici in tre parcelle localizzate presso la sede ENR di Castello D'Agogna e caratterizzate da diversa gestione irrigua (semina in acqua e sommersione continua - FLD; semina interrata e sommersione in 3°- 4° foglia - DRY; semina interrata ed irrigazioni turnate (riso aerobico) - IRR). I dati monitorati sono stati utilizzati per calcolare i bilanci idrologici a scala di parcella ed il valore di alcuni indici di efficienza del metodo irriguo e di produttività dell'acqua irrigua. Per estendere i risultati ottenuti nel caso del riso aerobico, fortemente condizionati dalla presenza di una falda a bassa soggiacenza, ad una più ampia casistica di situazioni, si è utilizzato il modello a base fisica SWAP per simulare i termini del bilancio idrologico e l'efficienza irrigua del metodo in diverse condizioni di soggiacenza freatica.

4.2.1 Analisi ed elaborazione dei dati

Si riportano di seguito alcune tra le principali analisi ed elaborazioni dei dati osservativi compiute al fine di meglio comprendere i fattori che influenzano il moto nell'acqua nelle parcelle sperimentali (è qui illustrato il caso della soggiacenza freatica) e di giungere ad una quantificazione di alcuni termini del bilancio idrologico (nel caso particolare del flusso di evapotraspirazione).

Soggiacenza della falda freatica. Un fattore che incide fortemente sui consumi irrigui del riso è la soggiacenza della falda freatica dal piano campagna. Negli appezzamenti sperimentali essa è risultata variare nel tempo a causa sia della gestione irrigua delle singole camere e delle camere adiacenti, sia in risposta agli andamenti della falda regionale (Figura 4.16). In particolare, si osservano differenze rilevanti tra le camere monitorate e anche, all'interno della stessa camera, tra l'estremità di monte e di valle di ciascuna camera, nonché tra i due anni di monitoraggio. Osservando la figura, la soggiacenza rispetto alla quota media del piano campagna nelle tre camere risulta aumentare da monte a valle (i.e. le linee blu sono sopra alle rispettive linee verdi) e dalla parcella T1 (DRY) alla T3 (IRR). Tale differenza di quote indica la direzione di moto dell'acqua.

La Tabella 4.12 permette un raffronto diretto dei valori medi del periodo dal 1 luglio al 31 agosto dei due anni e di evidenziare in modo sintetico le rispettive differenze. Se nel 2012 la falda declina in modo marcato dalla T1 (DRY) alla T3 (IRR), nel 2013 i livelli medi della T1 e della T2(FLD) risultano sostanzialmente equivalenti, indicando un minore flusso trasversale tra queste camere. Più in generale, nel 2013 si riscontra un avvicinamento della falda al piano campagna. L'innalzamento della falda è molto più pronunciato nell'estremità di valle per le camere T1 e T2, mentre si verifica in modo analogo per entrambe le estremità della camera T3. Nelle parcelle T1 e T2 dove c'è un forte incremento del livello di valle nel 2013, si raggiunge una minore pendenza monte-valle e dunque un minor flusso in tale direzione.

Gli effetti menzionati sono con ogni probabilità da attribuire al cambiamento di coltura nell'appezzamento a valle delle parcelle sperimentali, che ospitava soia nel 2012 e riso in sommersione nel 2013.

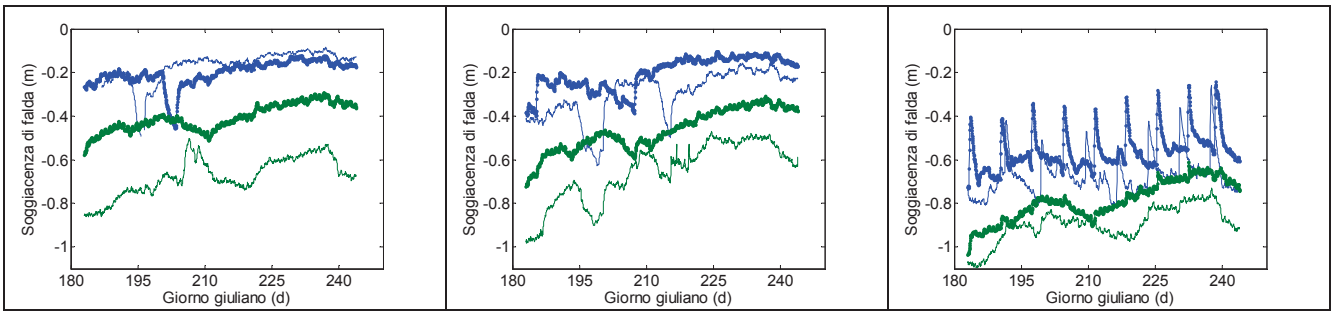


Figura 4.16. Andamenti del livello di falda dal 1 luglio al 31 agosto misurati dai piezometri in testa (blu) e in coda (verde) nelle tre parcelle (T1-DRY, T2-FLD, T3-IRR) e nelle due annate (2012 linea sottile, 2013 linea spessa)

Tabella 4.12. Valori medi di soggiacenza di falda dal 1 luglio al 31 agosto misurati nei piezometri di monte e di valle per le tre camere e i due anni di monitoraggio (cm)

	2012		2013		Differenze (2013-2012)	
Parcella	Monte	Valle	Monte	Valle	Monte	Valle
T1 (DRY)	-17	-68	-20	-41	-3	27
T2 (FLD)	-30	-66	-20	-46	10	19
T3 (IRR)	-67	-89	-56	-79	11	11

Parametri biometrici ed evapotraspirazione. Periodiche campagne di misura (11 date nel 2012 e 14 nel 2013) hanno consentito di monitorare lo sviluppo del riso Gladio. I valori misurati di indice di area fogliare (LAI) e altezza della coltura monitorate per le tre gestioni irrigue ed i due anni sono riportati in Figura 4.17. I valori massimi di LAI e di altezza della vegetazione si verificano per tutte le gestioni irrigue tra la data di fioritura ed i successivi dieci giorni (fase di maturazione acquosa/lattea). Il riso coltivato in sommersione continua (FLD) presenta i valori di LAI più elevati (attorno a 6 m^2 m^{-2}) nonostante l'altezza raggiunta dalle piante non sia la più elevata tra i trattamenti irrigui (75-80 cm). Il riso in aerobiosi (IRR) mostra i valori di LAI e di altezza più bassi (rispettivamente meno di 5 m^2 m^{-2} e al massimo 70 cm). Il LAI del riso con sommersione che segue la semina interrata (DRY) ha un comportamento analogo a FLD nel 2013 e intermedio alle restanti due gestioni irrigue nel 2013; in ogni caso il riso raggiunge con questa modalità di gestione irrigua l'altezza maggiore (90 cm). La profondità di radicazione non oltrepassa la suola di aratura: rilievi effettuati in campo alla fine della stagione colturale hanno mostrato valori massimi tra i 40 e i 45 cm.

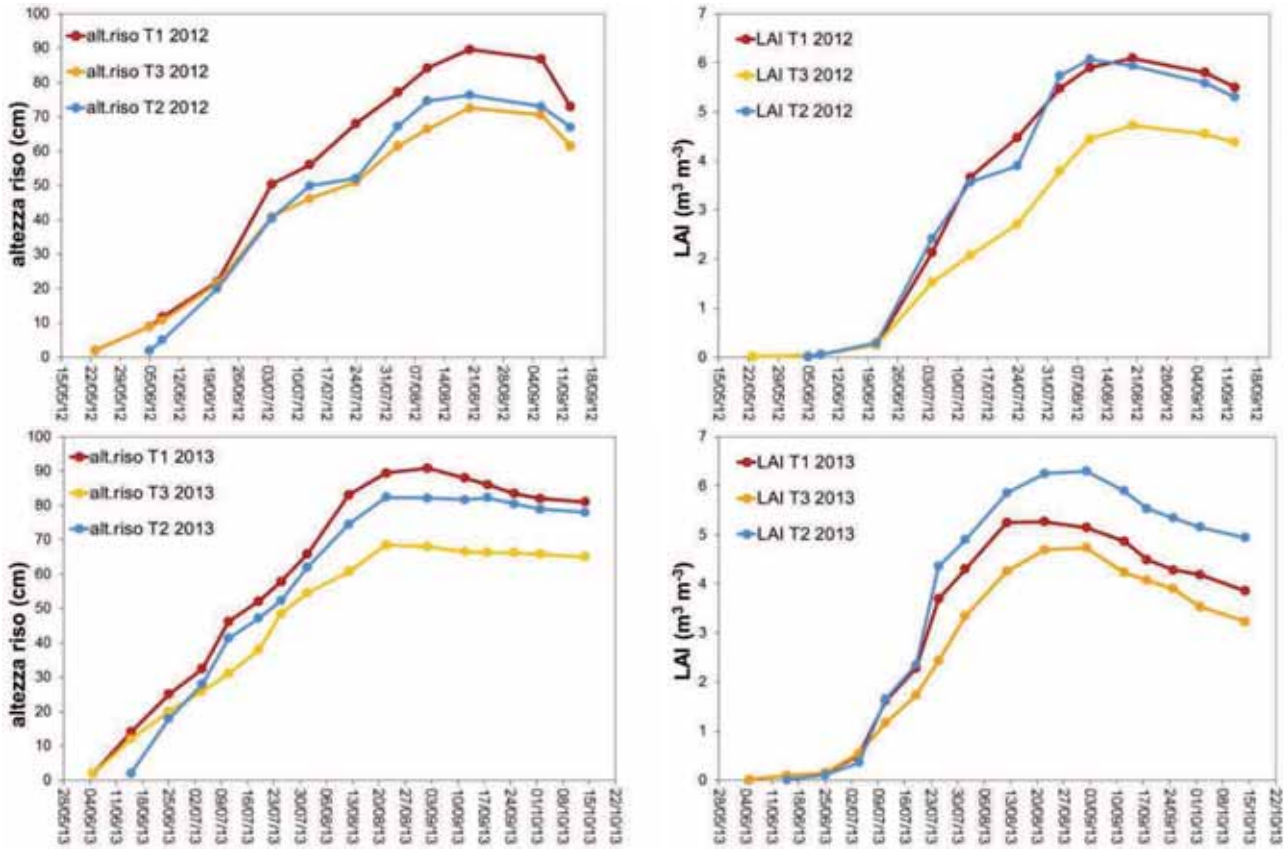


Figura 4.17. Altezza del riso e indice di area fogliare misurati a Castello D'Agogna nel 2012 e nel 2013

Gli andamenti dei parametri colturali sopra descritti sono stati utilizzati per stimare l'evapotraspirazione effettiva nel caso delle tre gestioni irrigue con modelli del tipo Penman-Monteith (Par. 3.2.2), calibrati nel caso dei trattamenti irrigui IRR e FLD utilizzando i dati acquisiti a passo semi-orario (30 min) dalla stazione eddy-covariance. La Figura 4.18 mostra le prestazioni dei modelli dopo la calibrazione per il periodo 14/07/2013 – 03/08/2013.

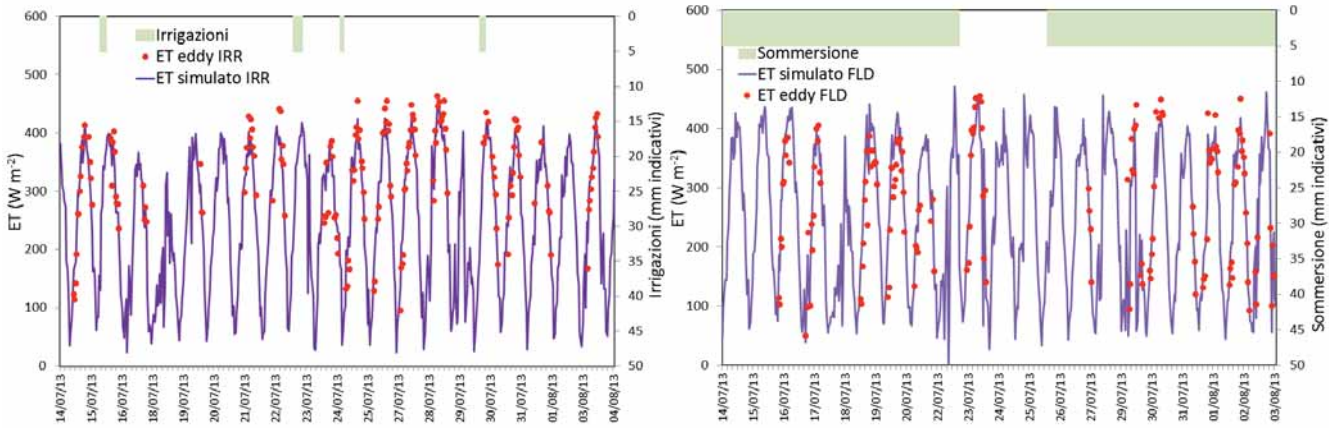


Figura 4.18. Andamento orario dell'evapotraspirazione per le gestioni irrigue IRR e FLD nel periodo 14/07/2013 – 03/08/2013: dati misurati (eddycovariance) e simulati dal modello dopo la sua calibrazione

I modelli calibrati hanno consentito di stimare l'evapotraspirazione complessiva (dalla data di semina per i trattamento DRY e IRR e dalla data di sommersione per il trattamento FLD) per le annate agrarie 2012 e 2013, così come il contributo a tale grandezza dato dai diversi termini (evaporazione dalla lama d'acqua, evaporazione dal suolo, traspirazione dalla pianta). I valori ottenuti sono mostrati in Figura 4.19.

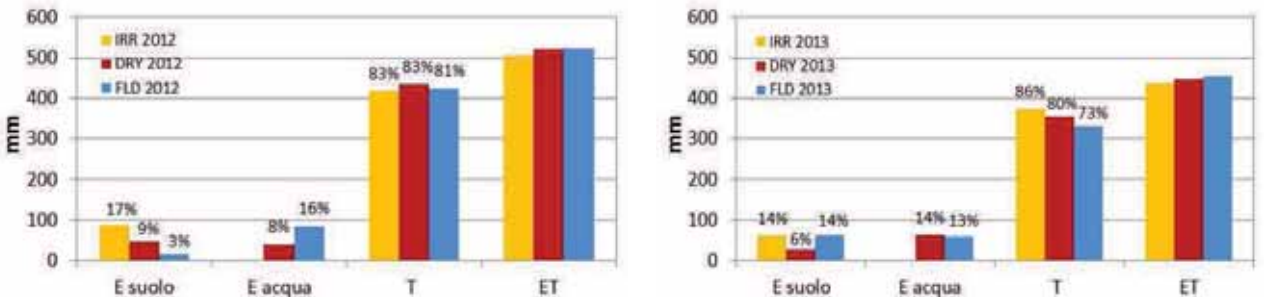


Figura 4.19. Evapotraspirazione totale e sue componenti per i trattamenti irrigui FLD, DRY e IRR e gli anni 2012 e 2013

Dai valori del tasso di evapotraspirazione giornaliera medio mensile dei tre sistemi di coltivazione del riso nei due anni e dal corrispondente valore di ET0 si sono ricavati i valori mensili del coefficiente colturale per gli anni 2012 e 2013 riportati in Figura 4.20. Tali valori sono in accordo con quelli rilevati in passato nel comprensorio risicolo della pianura padana nord-occidentale da altri autori utilizzando lisimetri (Allavena, 1995).

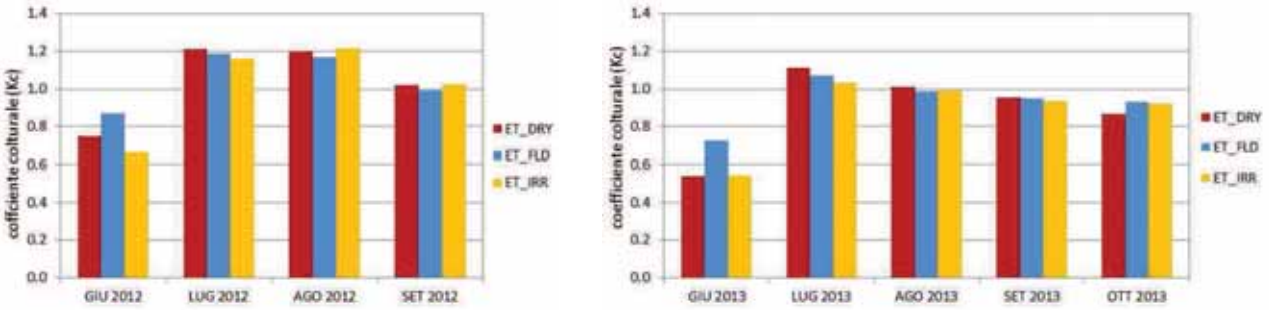


Figura 4.20. Valori sperimentali dei coefficienti colturali (K_c) per i trattamenti irrigui FLD, DRY e IRR e gli anni 2012 e 2013

4.2.2 Risultati del bilancio idrologico ed efficienza d'uso dell'acqua

Il monitoraggio in continuo dei flussi idrici in ingresso ed uscita e dei volumi immagazzinati nelle camere di risaia ha permesso, dopo opportune elaborazioni compiute sui dati osservativi (necessarie soprattutto per il flusso di evapotraspirazione), di stimare il flusso residuo attribuibile ai processi di percolazione e risalita capillare. Nelle Tabelle 4.13 e 4.14, tale valore è definito come "residuo di bilancio" e deriva dall'applicazione dell'equazione di bilancio idrologico alla zona radicata (40 cm). Il termine residuo assume valori negativi se prevale il flusso di percolazione e positivi se prevale il flusso di risalita capillare dalla falda freatica.

La Tabella 4.13 presenta il bilancio in relazione all'annata 2012 per il periodo dal 15-25 maggio, rispettivamente coincidenti con la semina nella T1 (DRY) e nella T3 (IRR) e con la sommersione pre-semina nella T2 (FLD), al 21 settembre (data di inizio raccolta) per un durata di 130-120 giorni. In tale periodo, la pioggia complessivamente caduta è di 170-133mm; il processo evapotraspirativo asporta in media 517 mm di acqua (l'entità varia a seconda del sistema di coltivazione del riso); la variazione di contenuto idrico del suolo dalla fine all'inizio del periodo di riferimento è nulla o leggermente positiva (+21 mm) o negativa (-9 mm): ciò indica che alla fine della stagione la quantità d'acqua stoccata nel suolo è uguale o leggermente superiore o inferiore rispetto all'inizio. Data l'esigua importanza di molti termini del bilancio, ne consegue

che i termini maggiormente determinanti sono quelli relativi ai flussi irrigui in ingresso e in uscita. Il calcolo del residuo del bilancio mostra una percolazione netta complessiva pari a -2408 mm per la camera T1 (DRY), -2843 mm per la T2 (FLD) e soli -46 mm per la T3 (IRR).

In Tabella 4.14 sono invece illustrati i risultati ottenuti per l'annata 2013. A fronte di un quota evapotraspirativa media di circa 446 mm (più bassa dell'anno precedente), un valore di pioggia di 128-133 mm e un incremento dell'umidità del suolo alla fine della stagione agraria in media di 16 mm, il temine residuo di bilancio si riduce, se confrontato con l'annata precedente, a -591 mm nel caso della T1 e -675 mm nel caso della T2 mentre diventa positivo (+3 mm) per la T3, indicando una seppur debole prevalenza della risalita capillare rispetto alla percolazione nel periodo di riferimento.

La sensibile diminuzione della percolazione netta da un anno (2012) al successivo (2013) per le camere T1 e T2 può essere spiegata con la diminuzione della soggiacenza, soprattutto nella porzione terminale delle camere (Figura 4.16 e Tabella 4.12). L'innalzamento significativo della superficie di falda (in media di 11 cm per la T3, di 12 cm per la T1 e di 15 cm per la T2) giustifica anche i minori flussi irrigui in ingresso per mantenere la stessa lama d'acqua nelle camere T1 e T2 nel 2013.

Tabella 4.13. Termini del bilancio idrologico per l'anno 2012 (in mm), a partire dalla semina nelle camere T1 (DRY) e T3 (IRR) e dalla sommersione pre-semina nella T2 (FLD) fino alla raccolta (I_i= flusso superficiale in ingresso, I_o= flusso superficiale in uscita); ΔS = variazione di umidità del suolo; il residuo di bilancio è dato dalla differenza tra percolazione e risalita capillare, quando negativo prevale la percolazione)

	periodo di riferimento			m. IN	m. OUT	pioggia	ET	ΔU suolo radicato [40 cm]	ΔL invaso camera	residuo del bilancio
	da:	*a:*	*giorni*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*
T1 (DRY)	15/5	21/9	130	5648	-2868	170	-521	21	0	-2408
T2 (FLD)	25/5	21/9	120	5145	-1912	133	-524	0	0	-2843
T3 (IRR)	15/5	21/9	130	940	-567	170	-506	-9	0	-46

Tabella 4.14. Termini del bilancio idrologico per l'anno 2013 (in mm), a partire dalla semina nelle camere T1 (DRY) e T3 (IRR) e dalla sommersione pre-semina nella T2 (FLD) fino alla raccolta (I_i = flusso superficiale in ingresso, I_o = flusso superficiale in uscita); ΔU = variazione di umidità del suolo; il residuo di bilancio è dato dalla differenza tra percolazione e risalita capillare, quando negativo prevale la percolazione)

	periodo di riferimento			m. IN	m. OUT	pioggia	ET	ΔU suolo radicato [40 cm]	ΔL invaso camera	residuo del bilancio
	da:	*a:*	*giorni*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*
T1 (DRY)	28/5	14/10	140	3083	-2163	133	-449	12	0	-591
T2 (FLD)	5/6	14/10	132	3695	-2671	128	-454	22	0	-675
T3 (IRR)	28/5	14/10	140	1112	-797	133	-436	15	0	3

La Tabella 4.15 riporta i valori di efficienza d'adacquamento e di produttività dell'acqua assoluti EA e PA, ed i valori degli indici corretti EA' e PA', questi ultimi più significativi per valutazioni ad una scala spaziale vasta poiché consentono di tenere conto dei recuperi irrigui. Gli indici di produttività si sono potuti calcolare per il solo 2012, dal momento che non sono disponibili per il 2013 le produzioni di risone.

EA nel 2012 assume valori di 0,09 e 0,10 per il trattamento DRY ed il trattamento FLD e di 0,46 per il trattamento IRR, mentre nel 2013 aumenta a 0,14 per il trattamento DRY, 0,12 per il FLD e diminuisce a 0,35 nel caso di IRR. La maggior efficienza nelle parcelle caratterizzate da sommersione nella stagione 2013 è da attribuire ad una riduzione delle portate irrigue necessarie per il mantenimento delle condizioni di crescita ottimali, attribuibile principalmente alla diminuzione della soggiacenza di falda freatica.

Considerando l'efficienza di adacquamento EA' a scala di comprensorio (considerando cioè i volumi irrigui in uscita non come perdite ma come riusi in un sistema chiuso quale quello gestionale a scala di distretto o comprensorio irriguo) questa naturalmente cresce. Addirittura, nel caso del trattamento IRR l'efficienza EA' raggiunge per i due anni valori di 0,97 - 0,98, favorita com'è sia dal livello della falda freatica mantenuto elevato dalle camere in sommersione che la circondano, che dalle ridotte dimensioni del campo sperimentale che favoriscono la rapida distribuzione dell'altezza di adacquamento. Per i trattamenti DRY e FLD il valore di AE' nell'anno 2013 è rispettivamente di 0,43 e 0,39. Difficile è il confronto con la letteratura, poiché i dati disponibili si riferiscono ai paesi asiatici, in cui si conducono lavorazioni in acqua prima della semina per distruggere la struttura del suolo e creare uno strato massivo molto poco permeabile (*puddling*). Bouman et al. (2005), riporta in tali situazioni un'efficienza irrigua media di 0,33 per il riso in sommersione e di 0,45 per il riso aerobico. Tali valori sono più alti di quelli da noi misurati poiché, nonostante il consumo idrico per la preparazione delle camere prima della semina, la creazione dello strato poco permeabile limita le perdite per percolazione e dunque i fabbisogni irrigui durante la crescita della coltura.

Per quanto riguarda la produttività dell'acqua irrigua, per l'anno 2012 si sono calcolati valori di 0,18 – 0,20 e 0,35 -0,31 rispettivamente per PA e PA' nel caso dei trattamenti irrigui DRY e FLD. Per il trattamento irriguo IRR gli indici raggiungono valori di 0,62 e 1,27.

Le dotazioni specifiche (calcolate sulla base dei volumi in ingresso) nel primo anno (2012) sono alte per la T1 e la T2 (circa 5,0 L s^{-1} ha^{-1}) ma minori dell'unità nel caso della T3 (0,84 L s^{-1} ha^{-1}). Il secondo anno (2013) segna un riduzione sostanziale delle dotazioni per la T1 e la T2 (2,55 e 3,24 L s^{-1} ha^{-1}rispettivamente) e una maggiore disparità tra le due, mentre la T3 mantiene una dotazione prossima all'unità (0,92 L s^{-1} ha^{-1}) dovuta ad un incremento del numero di interventi irrigui. Le dotazioni misurate per le due annate sono in linea con quelle indicate dalla letteratura per il bacino risicolo lombardo-piemontese, Giardini (2000) riporta, per metodi tradizionali in tali aree, dotazioni tra 1 e 5 L s^{-1} ha^{-1}.

Quando si considera il contributo volumetrico per ettaro rispetto all'intera stagione colturale del riso, il trattamento DRY vede nel 2012 un'erogazione complessiva di oltre 56 mila m^3 che si riducono a quasi 31 mila nel 2013; il trattamento FLD passa da oltre 51 mila a quasi 37 mila, mentre la gestione IRR si assesta nei due anni rispettivamente a circa 9 mila e 11 mila.

Tabella 4.15. Lunghezza dei periodi di riferimento, area delle parcelle, volumi irrigui in ingresso ed in uscita, evapotraspirazione e pioggia coinvolti nella stima del coefficiente di efficienza d'adacquamento (EA) e di produttività dell'acqua irrigua (PA) assoluti e relativi alla gestione comprensoriale (EA' e PA'), della dotazione specifica e del volume irriguo complessivamente erogato

							al lordo delle uscite				*al netto delle uscite*			
2012	*giorni*	*area* (m^2)	*IN* (m^3)	*OUT* (m^3)	*ET* (m^3)	*P* (m^3)	*AE* (-)	*PA* (kg m^{-3})	*ls* $^{-1}$ ha^{-1}	m^3 ha^{-1}	*AE'* (-)	*PA'* (kg m^{-3})	*ls* $^{-1}$ ha^{-1}	m^3 ha^{-1}
T1 (DRY)	130	1815	10251	-5205	-946	309	0.09	0.18	5.03	56479	0.18	0.35	2.48	27801
T2 (FLD)	120	1879	9670	-3593	-986	250	0.10	0.20	4.96	51454	0.16	0.31	3.12	32338
T3 (IRR)	130	1848	1736	-1048	-934	314	0.46	0.62	0.84	9396	0.93	1.27	0.33	3723
2013														
T1 (DRY)	140	1878	5788	-4061	-844	250	0.14	_	2.55	30826	0.43	_	0.76	9194
T2 (FLD)	132	1841	6803	-4918	-836	235	0.12	_	3.24	36948	0.39	_	0.90	10238
T3 (IRR)	140	1882	2092	-1501	-820	251	0.35	_	0.92	11116	0.97	_	0.26	3142

4.2.3 Risultati della modellistica idrologica del sistema suolo-coltura

4.2.3.1 Calibrazione di SWAP per il riso aerobico a Castello D'Agogna

Il modello di flusso nel sistema suolo saturo – suolo insaturo – coltura – atmosfera SWAP (Soil Water AtmospherePlant model; Kroes e Van Dam, 2003) è stato implementato utilizzando l'ampia base di dati osservativi monitorati nella stagione agraria 2012 nella parcella con riso aerobico (IRR) del sito

sperimentale ENR di Castello D'Agogna. Per ottenere concordanza tra i dati sperimentali e le stime fornite dalla simulazione con SWAP, è stato indispensabile procedere alla calibrazione di alcuni parametri idraulici del suolo. Per fare questo si è selezionato l'algoritmo di ottimizzazione SCEM-UA (Vrugt et al., 2003), che è stato interfacciato con SWAP tramite script MATLAB appositamente sviluppati durante il progetto. La Tabella 4.16 mostra le caratteristiche fisico-chimiche degli orizzonti ed alcuni parametri idraulici significativi identificati. In particolare: Sa, Li, Ar indicano le percentuali di sabbia, limo e argilla nei singoli orizzonti; C org è la percentuale di carbonio organico; BD la densità apparente del suolo; Θ_{sat}, Θ_{10} eΘ_{1500} sono rispettivamente il contenuto idrico a saturazione, alla capacità di campo e al punto di appassimento; K_s è la conducibilità idraulica a saturazione.

Tabella 4.16. Caratteristiche fisico-chimiche del suolo per la parcella T3 (IRR) e alcuni significativi parametri idraulici identificati

Limiti orizz. (cm)	Sa (%)	Li (%)	Ar (%)	C org (%)	BD (kg/l)	Θ_{sat} (m^3/m^3)	θ_{10} (m^3/m^3)	θ_{1500} (m^3/m^3)	*Ks*(cm/d)
0-10	29,6	50,6	19,7	0,90	1,49	0,35	0,35	0,03	42,1
10-30	29,6	50,6	19,7	0,90	1,49	0,37	0,37	0,14	5,2
30-42	21,7	58,0	20,3	0,58	1,52	0,38	0,38	0,24	0,2
42-60	19,6	60,0	20,5	0,12	1,55	0,38	0,38	0,14	8,6
60-110	26,9	58,2	15,0	0,07	-	0,38	0,38	0,13	50,3
110-230	28,7	57,7	13,6	0,05	-	0,35	0,35	0,13	12,5

Dopo la calibrazione, il modello SWAP si è mostrato in grado di riprodurre accuratamente i termini del bilancio idrologico cumulati per la stagione agraria 2012 nella parcella T3 (IRR) riportati in Tabella 4.13. Il modello calibrato ha consentito, aggiuntivamente, di analizzare gli andamenti di tali termini con passo temporale giornaliero, come mostrato nella Figura 4.21. In particolare, nella figura sono illustrati in sequenza: ingressi (pioggia e irrigazione), evapotraspirazione effettiva e potenziale, contenuto idrico del suolo alle quattro profondità e flussi idrici (percolazione e risalita capillare) alla suola di aratura (posta a 42 cm dalla superficie). Per le ascisse dei grafici si è scelto il giorno giuliano (ossia il numero di giorni dall'inizio dell'anno), nella stagione agraria 2012 l'emergenza del riso si è verificata il 23 maggio (giorno giuliano 144), mentre la raccolta è stata effettuata il 21 settembre (giorno giuliano 265).

Il secondo grafico della Figura 4.21 mostra gli andamenti di evapotraspirazione potenziale ed effettiva, la cui differenza risulta essere maggiore agli inizi della stagione colturale. La traspirazione effettiva eguaglia quella potenziale lungo tutto il periodo (le due grandezze non sono mostrate in figura), pertanto il riso aerobico sembra non aver subito stress idrici. La riduzione del flusso di evapotraspirazione effettiva rispetto a quella potenziale è dunque sempre da imputarsi ad una riduzione dell'evaporazione dal suolo.
Nel terzo grafico sono mostrati gli andamenti misurati dell'umidità del suolo lungo la stagione (punti) alle quattro profondità dei sensori (10, 30, 50 e 70 cm) e i corrispondenti valori di umidità ottenuti con il modello SWAP calibrato (linee continue). Gli incrementi repentini delle umidità sono dovuti agli eventi piovosi e irrigui, mentre le fasi di discesa dei valori ai flussi evapotraspirativi e di percolazione. Si può notare come le umidità degli strati al di sotto della suola di aratura (rappresentate in colore azzurro e rosso) si mantengano sempre prossime alla saturazione a causa sia del regime idrico (irrigazioni frequenti e falda superficiale), sia delle particolari caratteristiche idrauliche del suolo. In generale, si può osservare una buona concordanza tra gli andamenti delle umidità misurate e quelle simulate dal modello lungo tutta la stagione agraria, indice che i parametri ottenuti in calibrazione riproducono in modo soddisfacente le caratteristiche del suolo alle diverse profondità e, pertanto, sono in grado di simulare in modo adeguato il suo comportamento idraulico. Le maggiori differenze rispetto al misurato che si riscontrano nella prima

parte della stagione potrebbero essere dovute sia a variazioni temporali delle proprietà idrauliche, sia ad una sottostima dell'altezza di irrigazione fornito al modello. Infatti i valori adottati rappresentano le altezze d'acqua infiltrata mediamente nell'intera parcella, che possono non corrispondere esattamente a quanto effettivamente infiltrato in corrispondenza delle sonde in cui è stata rilevata l'umidità del suolo a causa della variabilità spaziale dell'infiltrazione.
Nel penultimo grafico, in particolare, la scala cromatica è legata al logaritmo decimale del potenziale idrico del suolo cambiato di segno: il rosso evidenzia i potenziali più negativi (i.e. suolo più secco), mentre l'arancione e il giallo evidenziano valori via via più prossimi allo zero. I valori nulli e positivi del potenziale (i.e. terreno saturo e sotto il livello di falda) sono riportati con cromatismo blu uniforme. La linea bianca, sovrapposta ai valori simulati, è il valore di soggiacenza di falda misurata in campo. La sovrapposizione di tale linea ai valori simulati permette di individuare le corrispondenze tra la soggiacenza di falda misurata e quella simulata (limite dell'area blu).
Infine, nell'ultimo grafico della figura vengono riportati gli andamenti simulati di percolazione e risalita capillare al limite della suola di aratura per i quali non si hanno a disposizione valori misurati. Risulta evidente come la bassa soggiacenza della falda freatica (tra i 75 e i 100 cm, ad esclusione delle repentine diminuzioni dopo gli eventi irrigui) garantisca un importante contributo idrico sotto forma di risalita capillare, che quasi uguaglia il flusso percolativo.

4.2.3.2 Simulazione degli effetti di variazioni della soggiacenza di falda, delle caratteristiche idrauliche del suolo e della coltura

SWAP è stato utilizzato in prima battuta per estendere nel tempo e a diverse condizioni di soggiacenza freatica le valutazioni condotte per l'anno 2012 nell'appezzamento sperimentale dell'ENR a Castello D'Agogna coltivato con riso aerobico. Secondariamente, si è utilizzato per effettuare simulazioni relative al riso aerobico e al mais da granella in diverse condizioni di soggiacenza freatica sui suoli che caratterizzano il distretto di San Giorgio di Lomellina.
Per tutte le simulazioni si sono utilizzati dati meteorologici acquisiti dalla centralina ARPA di Castello D'Agogna per il periodo 2008-2013 e per l'anno 2003 (quest'ultimo considerato un anno estremo). In Figura 4.22 è illustrato l'andamento delle altezze di pioggia e di evapotraspirazione potenziale, ET0, nella stagione agraria (aprile-settembre) per le serie meteorologiche utilizzate per le simulazioni. Per riferimento, sono rappresentati nel grafico anche i valori medi di ET0 e pioggia nel periodo 1993-2013 (ed i minimi e massimi, all'estremo delle barre di errore). Si può notare come la stagione agraria 2013 sia caratterizzata da precipitazioni minime ed ET0 massima nel periodo 1993-2010.

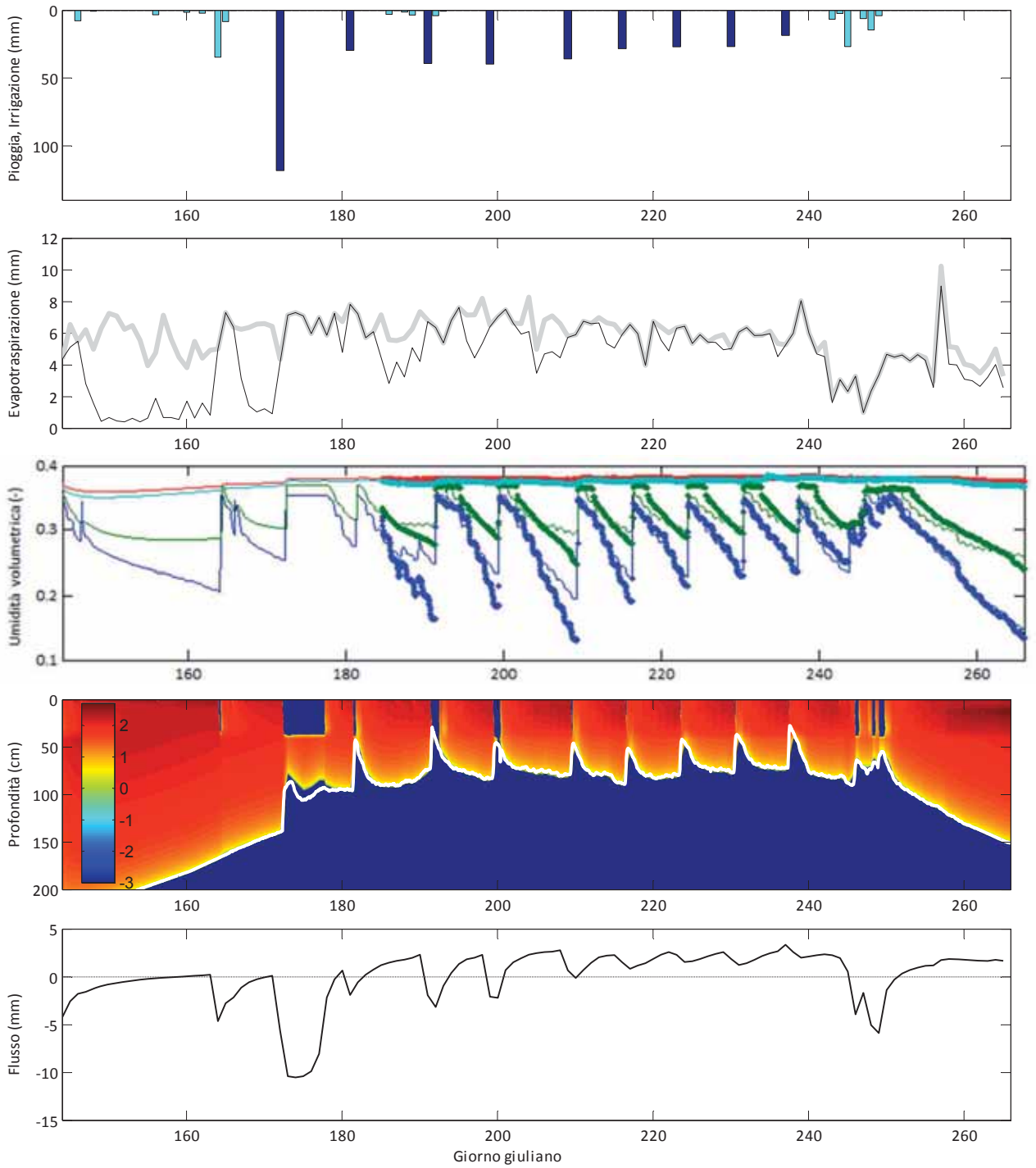


Figura 4.21. Riso aerobico, 2012. Dall'alto: pioggia e irrigazione (istogramma); evapotraspirazione simulata potenziale (linea grigia) ed effettiva (linea nera); contenuto idrico del suolo misurato (puntini) e simulato (linea) alle quattro profondità (blu 10 cm, verde 30 cm, rosso 50 cm, azzurro 70 cm); potenziale simulato e falda misurata; percolazione e risalita capillare al limite della zona radicata

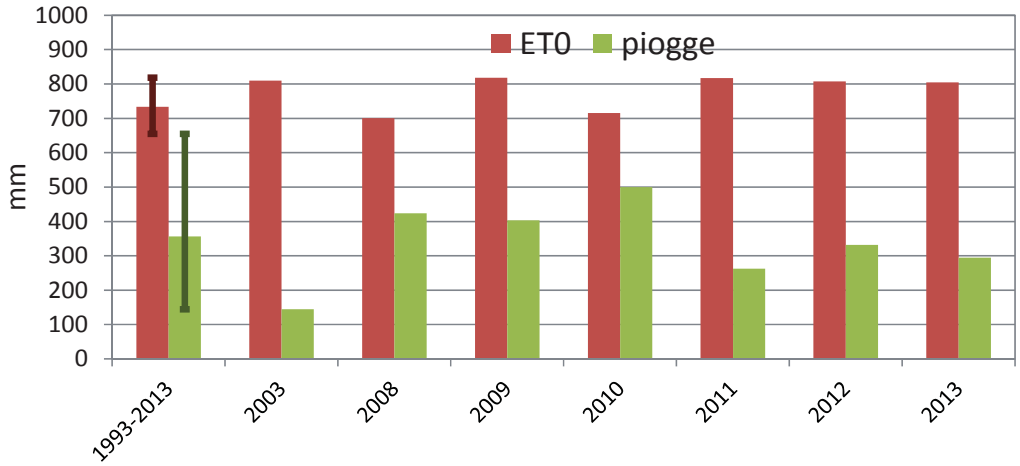


Figura 4.22. Cumulate mensili di ETo e precipitazione nella stagione agraria (aprile-settembre) per le annate meteorologiche utilizzate per le simulazioni (2003, 2008-2013) rispetto alle medie mensili e alle deviazioni standard delle stesse grandezze nel periodo 1993-2013

La lunghezza delle fasi fenologiche per il riso aerobico a ciclo medio-lungo (150 giorni) nei diversi anni si è stimata utilizzando un modello che considera la somma termica necessaria al raggiungimento di ogni fase (Gandolfi et al., 2010; Stockle and Nelson, 1996). In Figura 4.23 è rappresentata la lunghezza dell'intero ciclo colturale per gli anni di simulazione. Il valore dell'indice di area fogliare LAI (m^2 m^{-2}), dell'altezza colturale h_c (m) e della profondità raggiunta dall'apparato radicato D_r (m) per le diverse fasi fenologiche sono stati desunti dai dati misurati in campo negli anni 2012 e 2013 (Figura 4.17).
Per le simulazioni si sono mantenuti i parametri idraulici del suolo individuati nella simulazione relativa all'anno 2012, riportati, in parte, in Tabella 4.16.

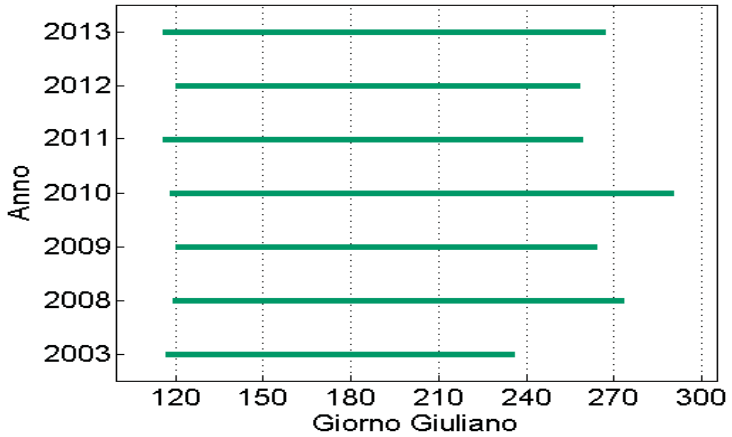


Figura 4.23. Lunghezza del ciclo colturale di un riso aerobico a ciclo medio-lungo per gli anni di simulazione

Le simulazioni hanno considerato sei differenti profondità della falda freatica dal piano campagna (-0.5 m, 0.75 m, -1 m, -1.5 m, -2 m, drenaggio libero) e due diversi scenari di gestione irrigua della parcella (irrigazione a domanda con interventi irrigui di 50 mm e irrigazione turnata interventi di 120 mm).
La Figura 4.24 riporta l'andamento dell'irrigazione nell'intera stagione irrigua e nel solo mese di punta (luglio) nel caso di somministrazione di interventi irrigui di 50 mm a domanda. La figura mostra inoltre la risalita capillare, la percolazione e l'efficienza irrigua per la gestione irrigua sopra citata nel caso dell'intera stagione irrigua. I blocchi blu rappresentano i risultati delle simulazioni per il periodo 2008-2012, in particolare la barra rossa rappresenta il 50° percentile, mentre i limiti inferiore e superiore del blocco blu

rappresentano rispettivamente il 75° ed il 25° percentile (ossia i valori superati rispettivamente nel 50%, nel 25% e nel 75% degli anni simulati) mentre le barre di errore includono il massimo e il minimo. I risultati per l'anno 2003, non considerati nel periodo 2008-2012, sono illustrati con una crocetta nera. L'altezza complessiva somministrata cresce al crescere della soggiacenza freatica, fino ad un valore mediano di 500 mm (10 interventi di 50 mm), quando la soggiacenza diventa tanto grande da non influenzare l'umidità nella zona radicata. Di tale ammontare complessivo, fino a 200 mm dev'essere somministrato nel mese di luglio (l'anno 2003 si allinea alla maggioranza degli altri anni). Il volume irriguo somministrato nel 2003 non è particolarmente elevato rispetto a quello dei restanti anni: questo poiché la maturità fisiologica in quell'anno viene raggiunta molto prima (Figura 4.23).

La risalita capillare è ovviamente molto alta quando la falda è vicina al piano campagna. Il contributo della risalita diminuisce al crescere della soggiacenza, diventando meno importante già con una falda a -1,5, -2 m dal piano campagna (contributo rispettivamente di 100 e 50 mm). La percolazione resta costante fino ad una profondità di falda di 1 m al di sotto del piano campagna, poi aumenta all'aumentare degli interventi irrigui fino a raggiungere valori attorno ai 230 mm quando la falda si trova ad una profondità molto elevata. Nel 2003 la percolazione è più contenuta rispetto agli altri anni, questo, a parità (o quasi) di interventi irrigui somministrati, indica in tale anno una necessità di utilizzare quasi completamente i 50 mm somministrati.

Per quanto riguarda l'efficienza irrigua, con falda molto superficiale l'indice risulta superiore all'unità dal momento che l'evapotraspirazione è più elevata rispetto alla somma degli apporti irrigui e meteorici per effetto del cospicuo apporto della risalita capillare (che non è considerata nel computo della efficienza irrigua), il valore unitario è ottenuto per una soggiacenza pari a -1,5 m dal piano campagna, profondità alla quale la percolazione eguaglia all'incirca la risalita capillare. Per soggiacenze maggiori l'indice scende sotto all'unità. Nel 2003, a causa delle scarse piogge e dell'elevata evapotraspirazione, i 50 mm somministrati con le irrigazioni vengono utilizzati in modo più efficiente, infatti il valore dell'indice di efficienza è più elevato rispetto a quello dei restanti anni. Il rapporto tra la traspirazione effettiva e la potenziale (Teff/Tpot) è riportato in quanto è un indice di stress traspirativo della pianta. Nel caso di irrigazione a domanda con un apporto di 50 mm, la coltura non mostra rilevanti condizioni di stress; l'indice assume valori leggermente più bassi per il 2003 che per i restanti anni.

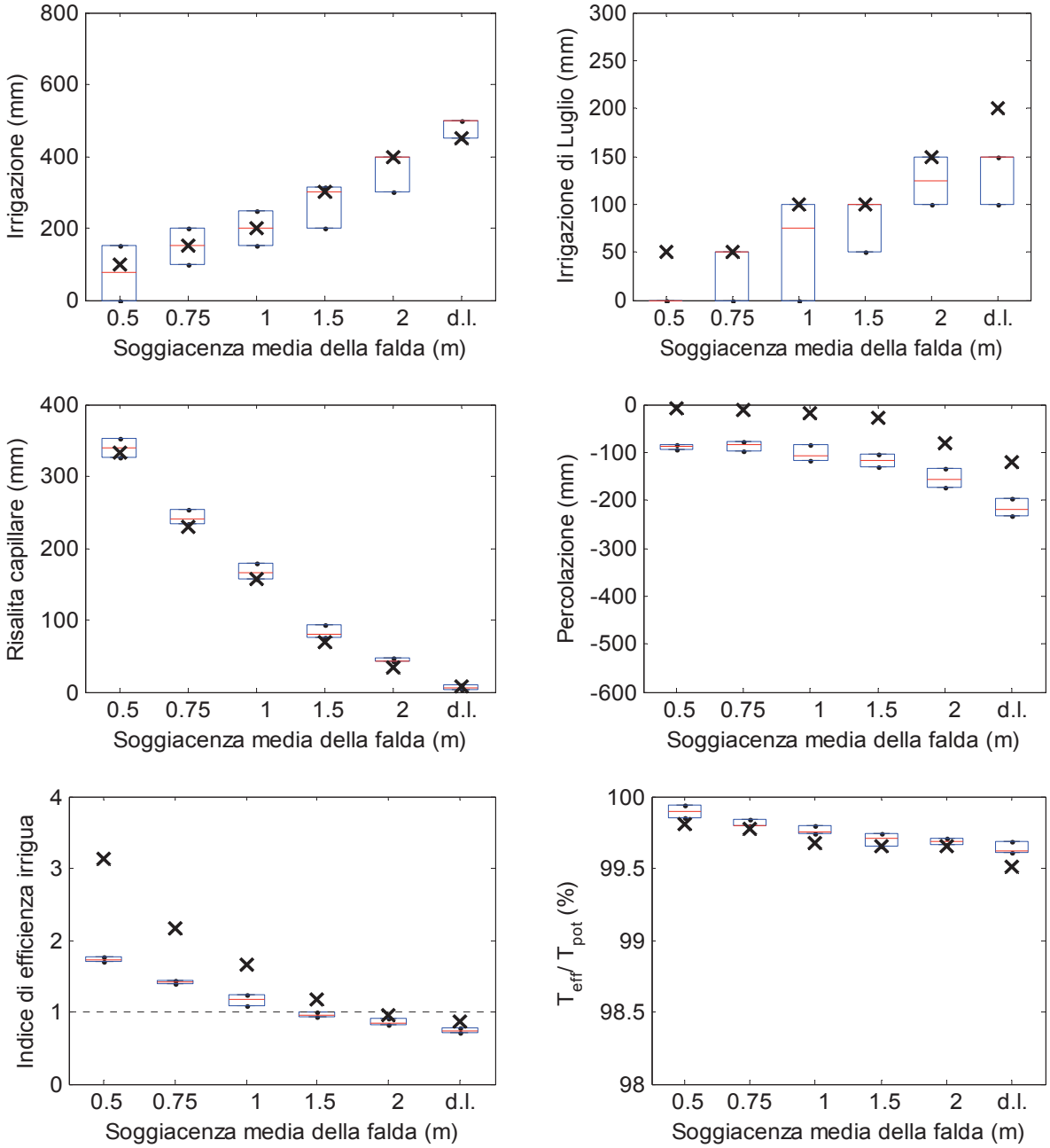


Figura 4.24. Box-plot dei risultati ottenuti dalle simulazioni con irrigazione di 50 mm a domanda effettuate per gli anni 2008-2013 al variare della soggiacenza di falda (la barra rossa rappresenta il 50° percentile, mentre i limiti inferiore e superiore del blocco blu rappresentano rispettivamente il 75° ed il 25° percentile); l'anno 2003 è indicato separatamente (con x)

La Figura 4.25 riassume i risultati delle simulazioni nel caso di irrigazione turnata (120 mm con turno 15 giorni), tipica della porzione del territorio gestito dal Comprensorio di Irrigazione e Bonifica Est Sesia in cui si trova il sito sperimentale ENR. Se il quadro d'insieme coincide con quello descritto per l'irrigazione a domanda esistono alcune differenze di rilievo. Dato che l'apporto irriguo è somministrato con un numero minore di interventi e con altezze d'acqua maggiori, si ha un aumento sia della percolazione che, di conseguenza, degli apporti irrigui totali necessari. Anche l'efficienza irrigua decresce raggiungendo l'unità per una superficie di falda posta a 75 cm dal piano campagna. Dall'ultimo grafico, che illustra l'andamento di Teff/Tpot con la profondità della falda, si può vedere come un'irrigazione turnata con turno 15 giorni e altezza d'adacquamento di 120 mm sia adeguata alla crescita del riso su un suolo quale quello di Castello

D'Agogna, sia in anni medi che in anni siccitosi, in quanto la coltura non presenta rilevante stress traspirativo: Teff/Tpot è infatti sempre prossimo all'unità, anche con falda molto lontana dal piano campagna e in anni siccitosi quali il 2003.

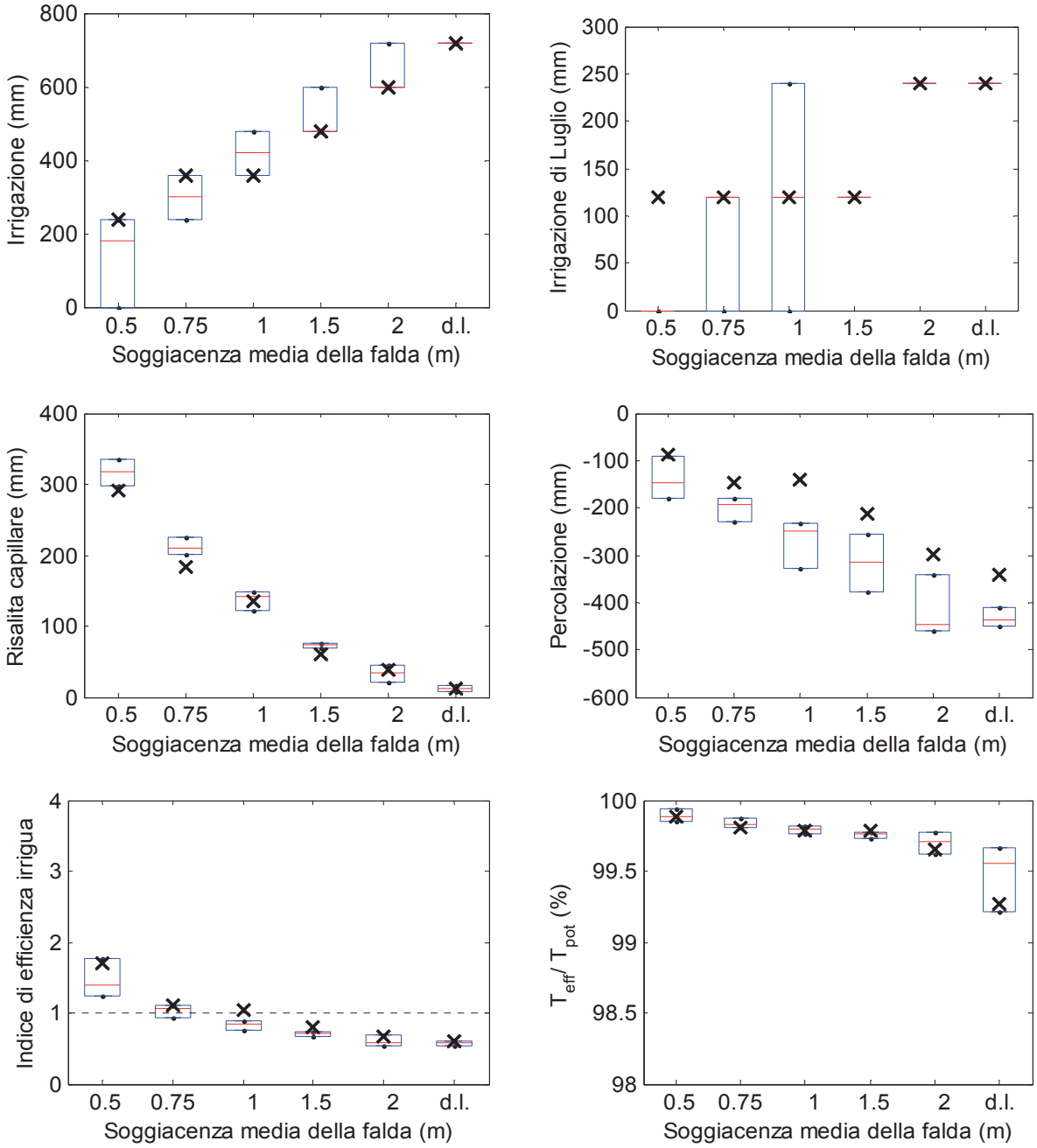


Figura 4.25. Box-plot dei risultati ottenuti dalle simulazioni con irrigazione di 120 mm e turno di 15 giorni effettuate per gli anni 2008-2013 al variare della soggiacenza di falda (la barra rossa rappresenta il 50° percentile, mentre i limiti inferiore e superiore del blocco blu rappresentano rispettivamente il 75° ed il 25° percentile); l'anno 2003 è indicato separatamente (con x)

Per necessità di sintesi non vengono qui riportati in dettaglio i risultati delle simulazioni condotte con SWAP per il riso aerobico ed il mais da granella nel caso dei suoli del distretto di San Giorgio di Lomellina, in diverse condizioni di soggiacenza freatica. I risultati più rilevanti riguardano, nel caso del riso aerobico, l'importante contributo della risalita capillare al soddisfacimento del fabbisogno idrico della coltura fino ad una soggiacenza freatica media pari a circa 1,5 m nei suoli limosi o franco-limosi (Castello D'Agogna), a 1,0 m nei suoli franchi (sub-distretto di San Giorgio, area ovest) e a 0,75 m nei suoli sabbiosi (sub-distretto di

San Giorgio, area ovest). Al più contenuto contributo della falda nel caso dei suoli più grossolani, corrisponde un aumento dei volumi irrigui somministrati quando si adotta una gestione irrigua a domanda, nonché del deficit traspirativo nel caso di irrigazioni turnate. Per tale ragione, per le simulazioni nel caso di irrigazione turnata con riso aerobico nel distretto irriguo di San Giorgio, si è ritenuto più opportuno adottare un turno irriguo di 7 giorni anziché di 15.
Simulazioni con variazioni di soggiacenza condotte per il mais per i due sotto-distretti di San Giorgio mostrano condizioni di stress da eccesso idrico della coltura, al quale il mais è soggetto, quando la soggiacenza di falda è minore di 1 m. Per l'area est il terreno sabbioso determina una rapida riduzione della risalita capillare, che già con una soggiacenza di 1.0 m rende i fabbisogni irrigui paragonabili a quelli in assenza di falda. Per l'area ovest, tale soglia si sposta a soggiacenze di 1,5 m. Le differenze con il riso aerobico sono dovute alla profondità massima raggiunta dagli apparati radicali nel caso delle due colture, pari a 40-45 cm nel caso del riso aerobico indagato nel corso del progetto e di 80-90 cm nel caso del mais.
Le simulazioni relative alle coppie suolo-coltura presenti nel distretto di San Giorgio di Lomellina si sono utilizzate per stimare i fabbisogni irrigui e la ricarica alla falda freatica per il territorio distrettuale (Par. 4.3.1 e 4.3.2).

4.3 Gestione irrigua e circolazione idrica territoriale

Vengono di seguito riportati i risultati dell'analisi delle componenti del bilancio idrologico a scala distrettuale per gli anni 2010 e 2011. A seguire, viene illustrata la valutazione degli effetti sui fabbisogni irrigui territoriali, sulla ricarica alla falda freatica e sulla suasoggiacenza dal piano campagna di uno scenario di cambio di uso del suolo che prevede una conversione del sistema di coltivazione del riso dalla sommersione al riso aerobico.

4.3.1 Bilancio idrologico per gli anni 2010 e 2011

I fabbisogni irrigui al campo, F_c, sono stati ottenuti nel caso del mais da granella, del riso aerobico e delle parcelle con colture non irrigue a partire dalle simulazioni effettuate per le unità suolo-coltura, considerando una soggiacenza media nel periodo agrario pari a 1,0 m per entrambi gli anni (si veda il paragrafo che segue per l'analisi dei dati di falda freatica disponibili). Per quanto riguarda il riso caratterizzato da semina in acqua e sommersione continua, si è utilizzato un coefficiente di efficienza del metodo irriguo pari a 0,29 per la porzione del distretto ad ovest del torrente Erbognone; tale valore viene dalla media dei valori ottenuti dalle prove di campo presso il sito sperimentale ENR di Castello d'Agogna (Par. 4.2.2) per il trattamento FLD e DRY. Per la porzione a est, a causa della natura molto più sciolta dei suoli, si è ritenuto più opportuno utilizzare un valore pari a 015.
Il grafico di Figura 4.26 mostra l'andamento dei volumi consegnati dai canali irrigui per l'annata 2010, accanto a quelli forniti dalle piogge, a quelli restituiti sotto forma di colature misurate e ai fabbisogni irrigui al campo (al netto delle efficienze di adduzione e trasporto). Nel grafico è riportato anche l'andamento della soggiacenza nel 2010 misurata nel pozzo di Ottabiano (072A in Figura 3.29). Tutte le grandezze sono espresse come altezze d'acqua medie per unità di superficie del territorio del distretto irriguo.
Dall'applicazione dell'equazione di bilancio riportata nel Par. 3.2.3.2., si può affermare che la differenza tra le altezze irrigue in ingresso ed in uscita ($I_i - I_o$) ed il fabbisogno irriguo al campo F_c coincide con la somma di tutti i termini di cui non è possibile effettuare una stima affidabile, e in particolare: l'evaporazione dai canali, $E_{H20\text{-}C}$, la percolazione dai canali, D_C, la variazione del volume invasato al di sopra del piano campagna nelle camere di risaia, ΔS_{H20}, e nei canali,$\Delta S_{H2O\text{-}C}$, e, infine, le possibili uscite superficiali dal sistema sotto forma di coli non monitorati I_{o2}. I termini D_C e ΔS_{H20} giocano senz'altro il ruolo di maggiore rilievo, il secondo dei due fattori in particolare nei mesi in cui vengono allagate (aprile-maggio) e asciugate (settembre) la maggior parte delle risaie.

La pioggia P è riportata in figura per mostrare come all'aumentare delle precipitazioni diminuiscano i fabbisogni irrigui, nel computo del bilancio è già in realtà in parte inclusa nel termine F_c.
Come si può notare, nei primi mesi (aprile-maggio) della stagione irrigua, il volume d'acqua immesso nel comprensorio serve in minima parte a soddisfare le richieste delle colture. Ad esclusione di una piccola quota che viene restituita tramite colature, il resto costituisce verosimilmente acqua infiltrata dai canali, D_C, e dagli appezzamenti, D_a, che determina l'aumento dell'umidità del suolo, ΔU, fino alla saturazione nelle risaie in sommersione e la costituzione ed il mantenimento della lama d'acqua che le sommerge ΔS_{H20}. Le efficienze irrigue per il riso in sommersione, considerate costanti nella stagione irrigua, sono dunque molto probabilmente sottostimate per questa prima parte della stagione caratterizzata dall'allagamento delle risaie. Le alte portate irrigue disponibili in tale periodo giustificano infatti forti percolazioni che vanno ad alimentare la falda freatica, come dimostrala riduzione della soggiacenza della falda, che passa da 1,75 m a 1,05 m alla stazione di Ottobiano.
Il periodo estivo (giugno-agosto) è caratterizzato dall'assenza di colature e da una falda freatica ad una profondità ormai costante (0,99 ± 0,05 m) dal piano di riferimento. Le risaie ormai sono sommerse e l'altezza del battente irriguo viene mantenuta più o meno costante. Il residuo di bilancio sarà dunque principalmente dovuto alle perdite dai canali D_C, che si attestano nel mese di luglio attorno al 20% dell'ingresso netto.
Nel mese di settembre, infine, ad una drastica riduzione dei volumi immessi con l'irrigazione, a seguito di una minore richiesta al campo in gran parte soddisfatta dalle piogge, segue un aumento delle colature dovute anche alla pratica di svuotamento delle camere a riso in sommersione. Come conseguenza di una riduzione della percolazione dagli appezzamenti agrari, D_a, si riscontra un abbassamento della falda (-0,32 m rispetto alla condizione di giugno-agosto).

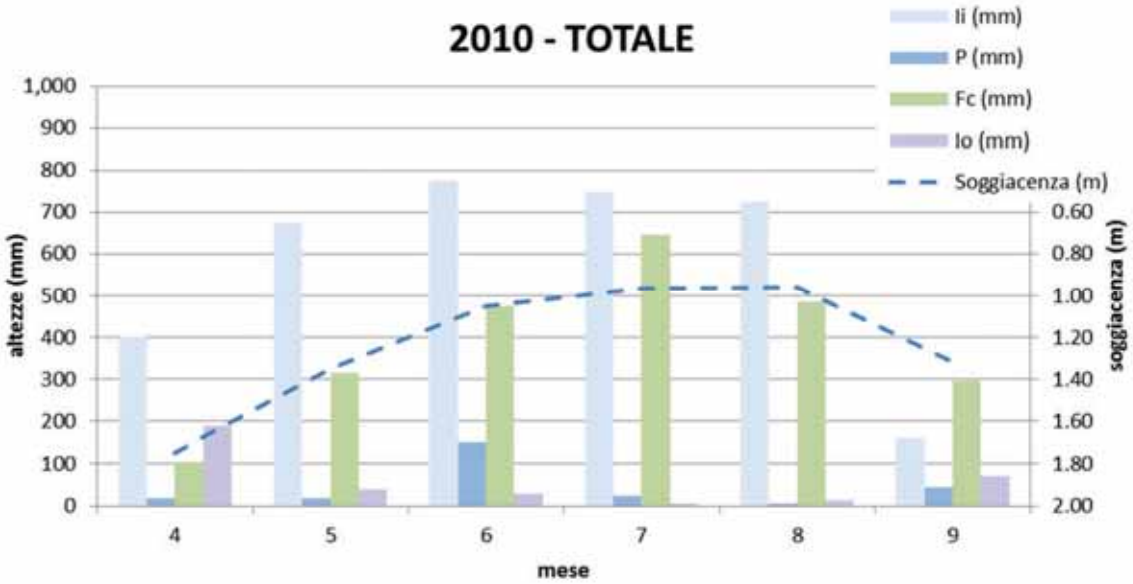


Figura 4.26. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo aprile-settembre 2010

L'analisi è stata svolta per il medesimo anno valutando separatamente il sub-distretto ovest dal sub-distretto est. Il sub-distretto ovest (Figura 4.27) mostra all'inizio dell'anno 2010 (aprile-maggio) un elevato apporto artificiale a fronte di un fabbisogno di circa un terzo, mentre risultano cospicue sia le precipitazioni che i coli. Nel trimestre giugno-agosto, l'apporto medio è più vicino al fabbisogno al campo, mentre coli e precipitazioni sono trascurabili. Il residuo di bilancio percentuale nel sistema ovest varia da un massimo del

74% nel mese di aprile ad un minimo del 14% nel mese di luglio. Come precedentemente introdotto, tali differenze all'inizio della stagione irrigua sono da imputarsi maggiormente al fattore ΔS_{H20}, mentre nei mesi centrali è maggiormente spiegata da D_C.
Diversa è la condizione riscontrata nel comparto est per il medesimo anno, per il quale non si evidenzia un residuo di bilancio particolarmente elevato nei mesi iniziali della stagione irrigua, probabilmente in seguito alla minore estensione delle superfici a riso in sommersione rispetto alle colture caratterizzate da altri metodi irrigui. Il residuo di bilancio percentuale va da un massimo del 40% nel mese di giugno ad un minimo di 25% nel mese di luglio. Inoltre, dalle Figure 4.27 e 4.28si nota come i valori medi sul territorio di disponibilità irrigua netta (I_i – I_o) siano maggiori nel caso del comparto est rispetto al comparto ovest, nonostante una minore estensione del riso in sommersione. Questo è con buona probabilità dovuto alla presenza di un suolo molto più grossolano, che porta dunque a perdite per percolazione, D, molto più significative.

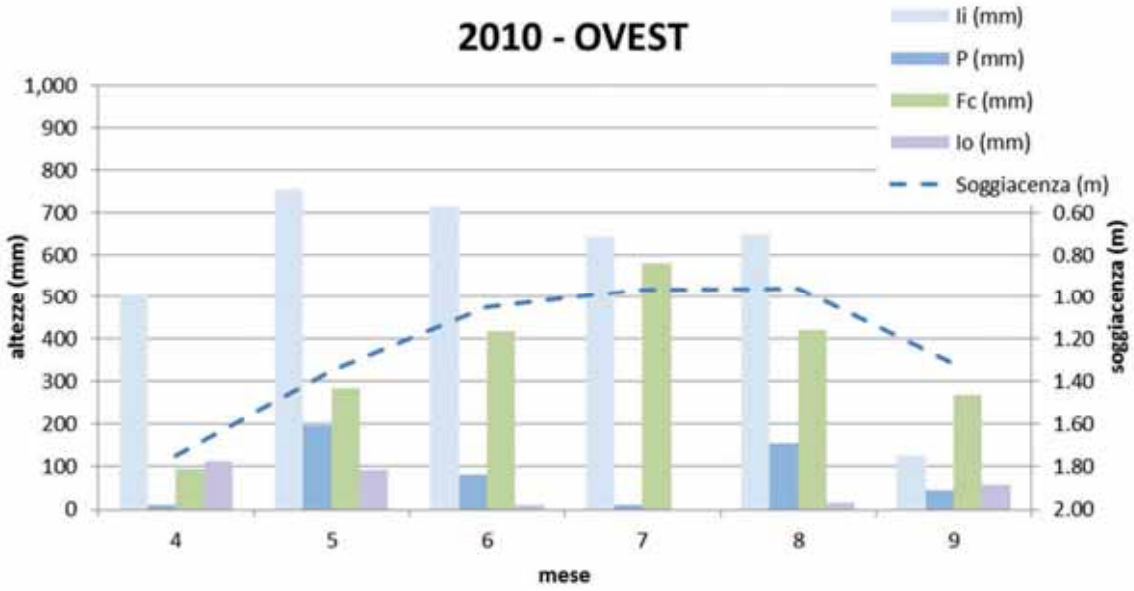


Figura 4.27. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo aprile-settembre 2010 per il comparto ovest

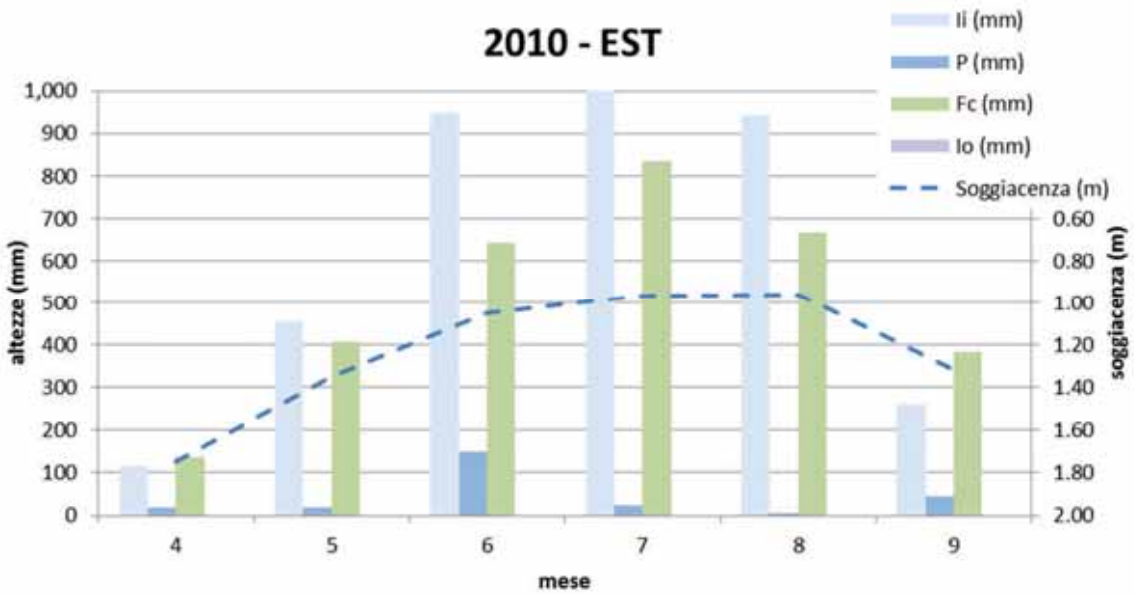


Figura 4.28. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo aprile-settembre 2010 per il comparto est

Il grafico di Figura 4.29 mostra l'andamento delle variabili precedentemente analizzate per l'anno 2011. Anche in questo caso si nota come alla messa in carica del sistema corrisponde una rapida diminuzione della soggiacenza di falda freatica. La soggiacenza si stabilizza poi attorno a 1.0 m nel mese di giugno.
Nel quadrimestre maggio-agosto, l'apporto irriguo medio è più vicino al fabbisogno irriguo medio. Infine, a partire da settembre, ad una riduzione delle portate irrigue (che rispondono logicamente all'andamento dei fabbisogni colturali) segue nuovamente una riduzione della quota di falda che si riavvicina ai livelli invernali. Il residuo del bilancio percentuale nell'annata agraria 2011 varia da un massimo del 64% ad inizio stagione (aprile) ad un minimo del 16 % nel mese di agosto.

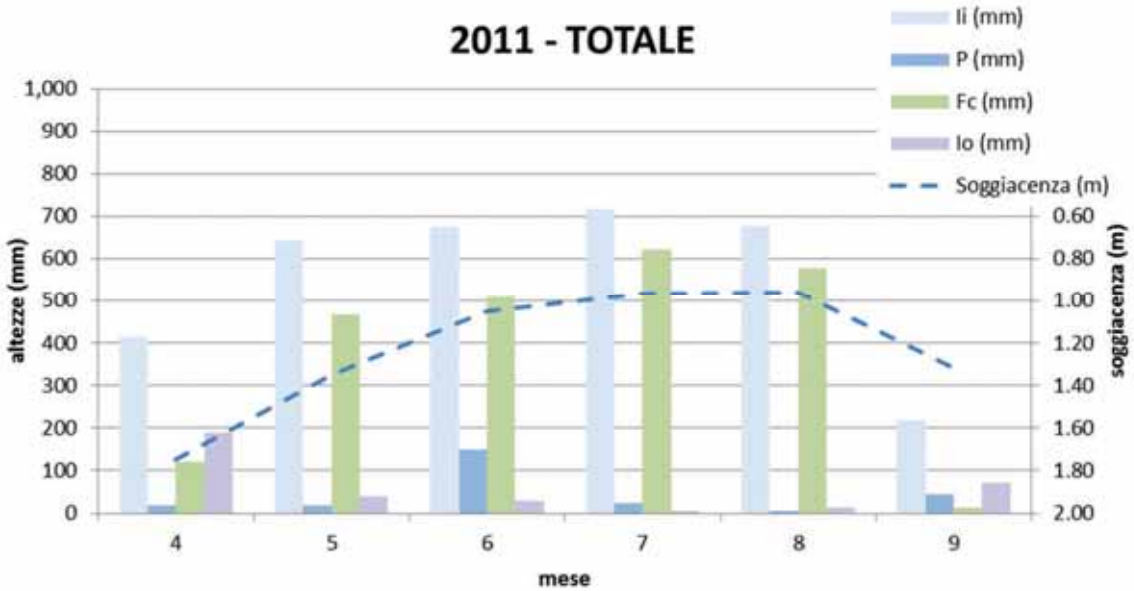


Figura 4.29. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo marzo-ottobre 2011

L'analisi per sub-distretti (Figure 4.30 e 4.31) mostra una situazione simile a quella già descritta per l'anno 2010. Nel comparto ovest gli apporti irrigui medi riferiti al territorio durante il periodo estivo sono molto più bassi rispetto a quelli nel sub-distretto est. Inoltre, anche per l'anno 2010 il residuo di bilancio percentuale è molto più basso all'inizio della stagione nel comparto est (22%) rispetto al comparto ovest (72%). Il valore minimo di questa grandezza si riscontra in entrambi i sub-distretti nel mese di agosto (17% per il sub-distretto ovest e 15% per quello est).

Dalle analisi condotte emerge che il residuo del bilancio percentuale nei mesi centrali della stagione irrigua, quando lo stesso dipende principalmente dalla perdita per percolazione dalla rete irrigua, D_C, è in tutti i casi in buon accordo con le perdite dai canali indicate dal Consorzio Irriguo e di Bonifica Est Sesia (10-20%). Questo pare dunque confermare l'attendibilità dei dati misurati utilizzati e dei parametri scelti per le simulazioni con i modelli suolo-coltura.

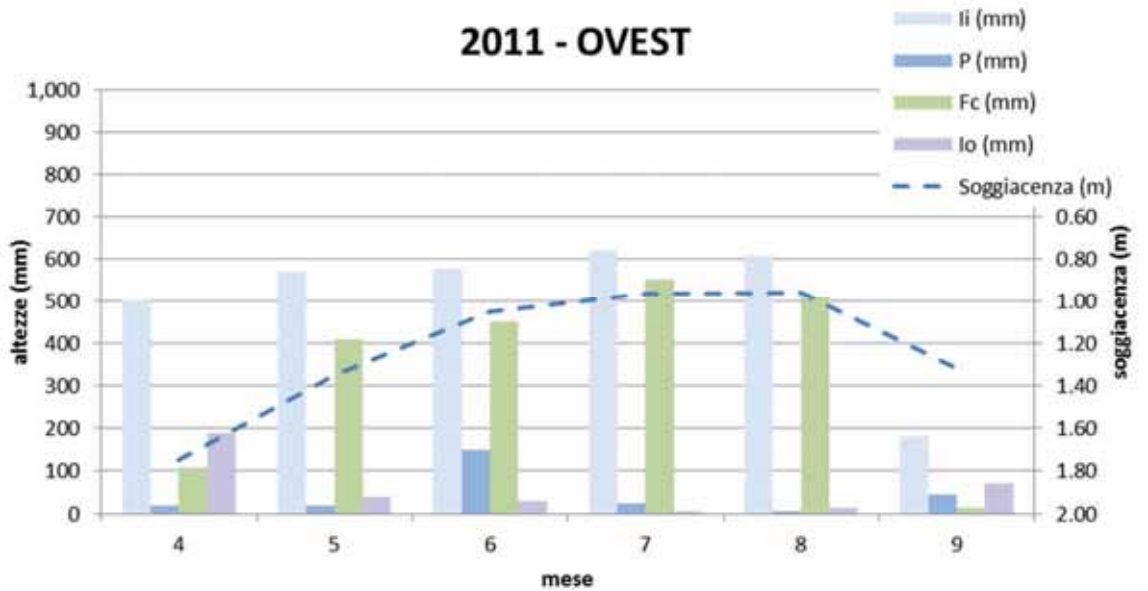


Figura 4.30. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo marzo-ottobre 2011 per il comparto ovest

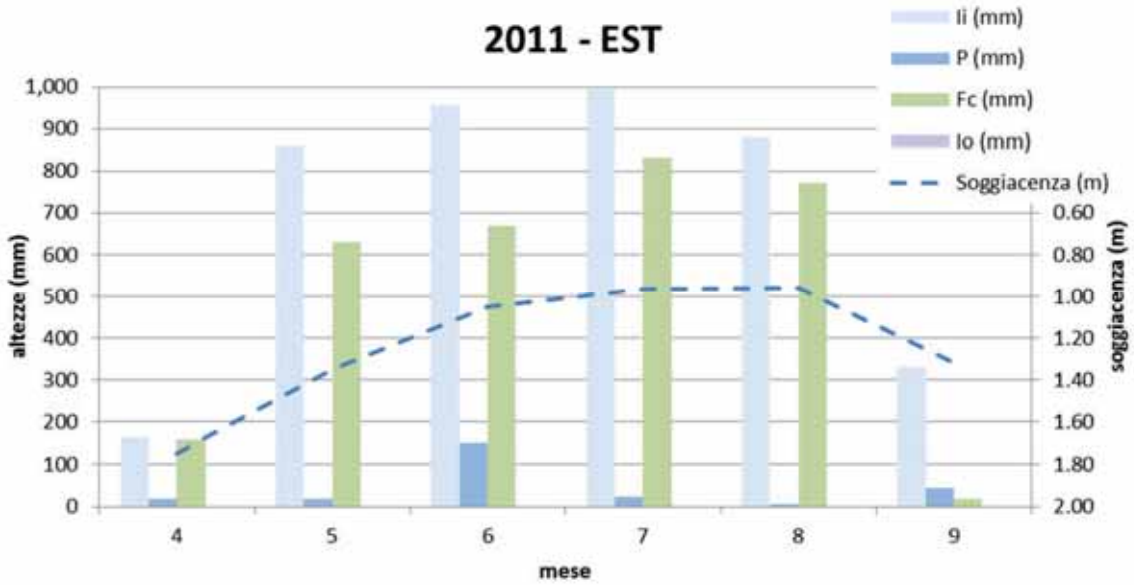


Figura 4.31. Variazione dei volumi irrigui, di quelli necessari per soddisfare i fabbisogni colturali e quelli in uscita dal sistema (colature) e confronto con l'andamento delle soggiacenze per il periodo marzo-ottobre 2011 per il comparto est

4.3.2 Scenario di conversione della gestione irrigua del riso da sommersione continua a irrigazione intermittente

I risultati sono presentati in modo distinto per i due sotto-distretti est e ovest, vista la diversa tipologia di suoli presenti e di uso del territorio nelle due aree e il diverso grado di attendibilità delle stime (decisamente più elevato per l'area est). La Figura 4.32 mostra la percolazione media nei sotto-distretti e le relative soggiacenze mensili (Ottabiano) per l'anno medio. Si osserva come con lo stato di fatto, riportato qui per facilitare il confronto, la percolazione risulti molto ingente e grossomodo costante nell'area est per la presenza di suoli con elevate percentuali di sabbia. Nell'area ovest la percolazione risulta più contenuta, con valori più elevati nella prima parte della stagione durante la quale le camere di risaia vengono allagate e viene messa in carica la falda mentre nel resto della stagione la percolazione si riduce ad opera del sostegno fornito dalla bassa soggiacenza della falda stessa.

Nell'area est si osserva una percolazione particolarmente importante malgrado una minore porzione di aree sommerse. Questo è con ogni probabilità da attribuirsi al mantenimento in sommersione delle risaie in un suolo particolarmente permeabile. Secondariamente, dato che per l'area est non sono disponibili misure di colo, se questi fossero presenti andrebbero a ridurre le portate infiltrate. Terzo, parte delle percolazioni vengono probabilmente restituite all'esterno del distretto con il concorso di deflussi sotto-superficiali o sorgenti fontanilizie (non monitorate) che, nell'analisi condotta, giustificano una maggiore velocità di scarica della falda e, in questo senso, concorrono nell'aumentare la percolazione stimata.

Stando agli esiti delle simulazioni effettuate con i modelli, per lo scenario di riconversione gli andamenti di percolazione e soggiacenza andamenti sono quelli mostrati in Figura 4.32. In confronto con Figura 4.33, nell'area est si osserva una riduzione molto ingente della percolazione netta e un aumento della soggiacenza che si attesta attorno a 1.75 m dal piano campagna (si è adottato il set di simulazioni per le unità suolo-coltura caratterizzate da soggiacenza freatica pari a 2 m). Con una falda a tale profondità la risalita capillare nell'area est è nulla.

Per l'area ovest si ha una riduzione del percolato, meno ingente che per l'area est e più intensa nella prima parte della stagione. La soggiacenza stimata per l'area ovest nella parte centrale della stagione risulta attorno a 1,35 m dal piano campagna (si è adottato il set di simulazioni caratterizzate da soggiacenza a 1,5 m), per la quale la risalita capillare è ancora in grado di dare un contributo al fabbisogno idrico delle colture. Si rammenta che mentre l'analisi per l'area est è attendibile, quella per l'area ovest è puramente indicativa degli andamenti mancando nell'analisi una serie di soggiacenze rappresentativa. Se la soggiacenza estiva reale fosse più modesta di quella registrata ad Ottabiano, cosa che si potrebbe verificare dato il differente tipo di suolo, i modelli utilizzati renderebbero parimente una soggiacenza estiva per l'area ovest inferiore di quella rappresentata in Figura 4.33.

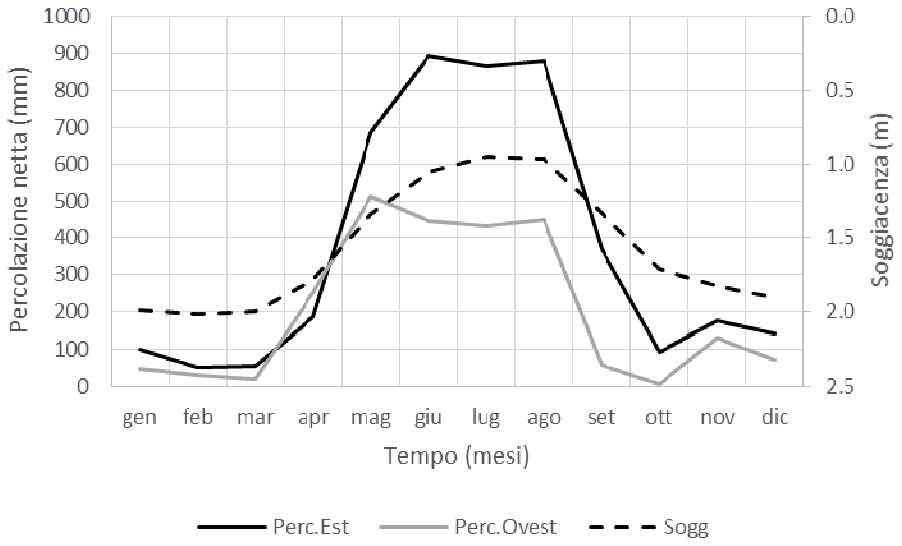


Figura 4.32. Percolazioni e soggiacenze mensili medie per lo stato di fatto (piezometro di Ottabiano)

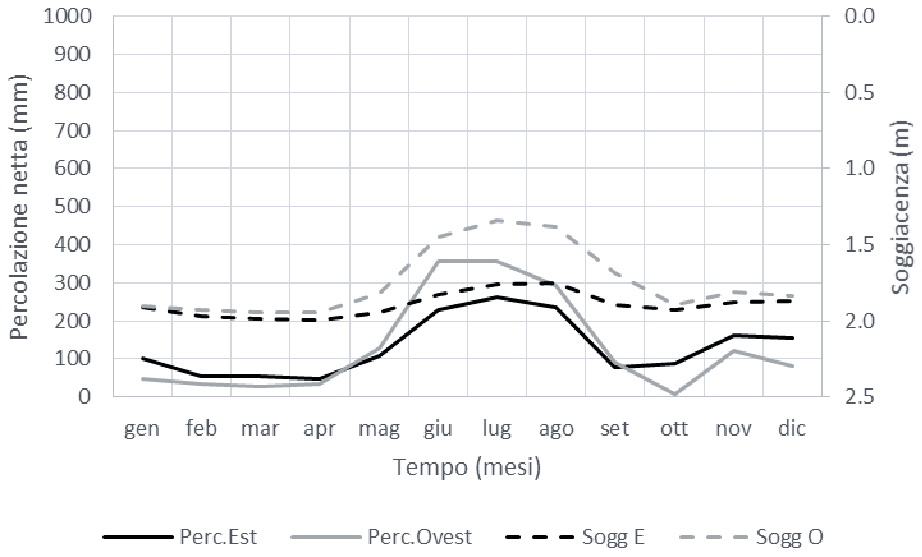


Figura 4.33. Percolazioni e soggiacenze mensili medie per lo scenario di conversione a riso aerobico

La Figura 4.34 illustra le portate complessive dei canali (valori per l'anno medio) per lo stato di fatto (SF) e lo scenario di riconversione (SR) nel caso delle aree est e ovest.

Le risposte del sistema attese per il cambio di regime irriguo sono molto differenti per le due aree. Nell'area est si prevede una forte riduzione delle portate necessarie, da attribuirsi ad una importante differenza tra fabbisogni irrigui con il sistema colturale dell'irrigazione turnata in un terreno particolarmente sciolto.

Nell'area ovest la riduzione delle portate si ha sostanziale nella prima parte della stagione, venendo meno la messa in carica delle risaie e della falda. Nella seconda parte della stagione, i fabbisogni delle due tecniche irrigue sono più confrontabili, anche se si prevede una riduzione dei fabbisogni irrigui che si attesta attorno al 15% nei mesi di giugno-luglio e cresce nel mese di agosto.

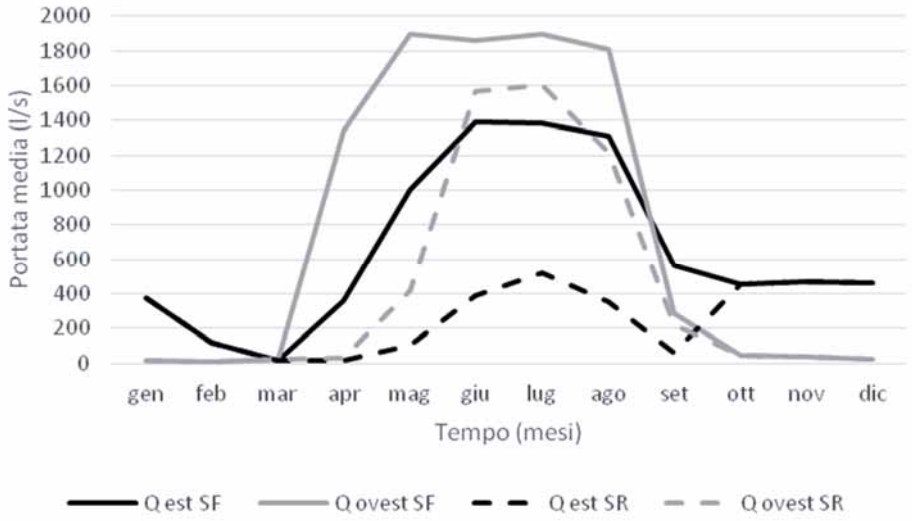


Figura 4.34. Media mensile delle portate complessive delle rogge che servono le aree est e ovest nell'anno medio con lo stato di fatto (SF) e lo scenario di riconversione (SR)

La sostituzione della sommersione continua del riso con l'irrigazione intermittente produce dunque una modifica sostanziale dei fabbisogni irrigui, con una significativa riduzione dei volumi complessivi stagionali utilizzati per l'irrigazione.

Nell'area est la riduzione prevista per le portate è del 75% (da 16 a 4 milioni di m^3). Si tenga però presente che le portate stimate per lo scenario non tengono conto di una probabile riduzione dell'efficienza della rete irrigua dovuta ad una maggiore percolazione causata dall'aumento della soggiacenza di falda; riduzione che nell'area est potrebbe risultare particolarmente cospicua sia per la maggiore soggiacenza prevista sia per la natura sabbiosa dei suoli.

Nell'area ovest si prevede una riduzione del 44% (da 24 a 13 milioni di m^3). Per quest'area però le stime sono da considerarsi solamente indicative mancando dei dati di soggiacenza di falda rappresentativi per questo sotto-distretto.

Per l'intero distretto San Giorgio di Lomellina le portate si riducono del 67%, passando da circa 39 milioni di m^3 nella situazione attuale a circa 17 milioni di m^3 nel caso di una conversione completa del metodo di coltivazione del riso. La conversione comporta inoltre una riduzione dei volumi irrigui mensili, anche se in modo minore per i mesi di giugno e soprattutto di luglio (in particolare per l'area ovest); in quest'ultimo mese la portata complessiva necessaria per l'irrigazione del distretto passa da circa 3,3 $m^3\ s^{-1}$ a 2,1 $m^3\ s^{-1}$. Tuttavia, la conversione potrebbe comportare una riorganizzazione gestionale e talvolta anche infrastrutturale delle reti irrigue di minori dimensioni (in particolare le reti aziendali), dal momento che le portate consegnate agli appezzamenti passano da una dotazione relativamente bassa dispensata in continuo (circa 2,5 L s ha^{-1}, Par. 3.2.7) a corpi idrici intermittenti ma più elevati consegnati sulla base di turni stabiliti in un calendario irriguo.

Nel valutare i risultati, si tenga infine presente che le portate simulate non conteggiano i volumi necessari alla messa in carica della rete che possono spiegare parte delle differenze previste nei primi mesi della stagione irrigua.

4.4 Aspetti fisiologici, ionomici e metabolomici

4.4.1 Stato fisiologico della coltura, mappe e analisi ionomiche

Le analisi fisiologiche condotte in campo sulla coltura, hanno permesso di evidenziare in tutte le varietà una certa sofferenza fotosintetica nel caso della crescita in condizioni di IRR. Infatti, nonostante a parità di disponibilità di azoto la concentrazione della clorofilla valutata nelle foglie bandiera dalla fioritura alle fase di maturazione immediatamente precedente la senescenza rimaneva inalterata rispetto alle condizioni FLD e DRY, la fluorescenza emessa risultava significativamente superiore. Tale minor efficienza fotosintetica potrebbe almeno in parte giustificare le perdite produttive osservate in condizioni di IRR rispetto alle due altre tipologie di conduzione irrigua della risaia.

Le mappe ionomiche della granella delle quattro varietà di riso considerate nelle prove parcellari condotte presso il Centro Ricerche dell'Ente Nazionale Risi evidenziamo come le tre diverse conduzioni irrigue influenzano diversamente i livelli solo di alcuni elementi.

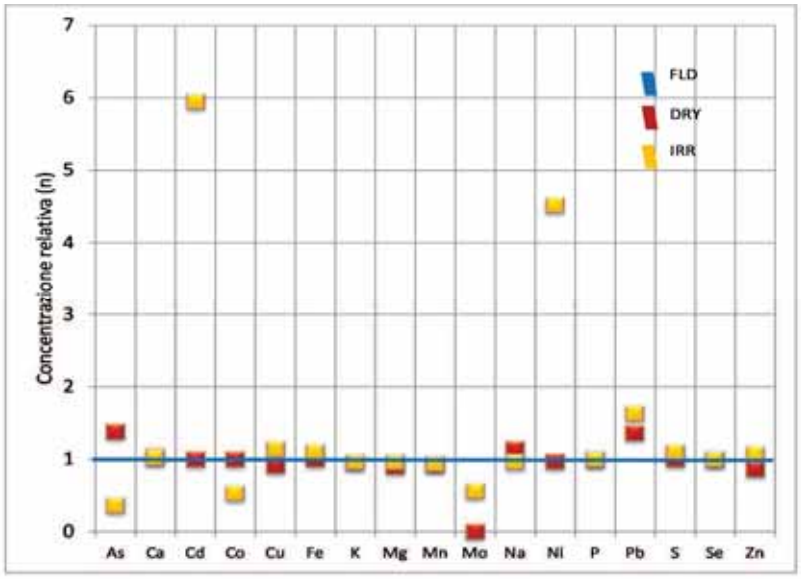


Figura 4.35. Mappa ionomica delle cariossidi della cultivar Selenio in relazione alle diverse condizioni irrigue della risaia. La condizione FLD è assunta come riferimento

In particolare, considerando la cv Selenio: a) la condizione IRR provoca forti aumenti nei livelli di Cd Ni e di Pb e riduzioni significative dei livelli di As, Co e Mo; b) la condizione DRY determina aumenti significatavi dei livelli di As e Pb. Per le altre gli effetti relativi sono del tutto simili. In maggior dettaglio, la varietà Selenio sembra dotata di una maggior capacità rispetto alle altre tre di escludere il Cd dalla granella integrale, nella condizioni DRY. Tale capacità non si manifesta chiaramente nella altre due condizioni. Nonostante il livelli di Cd nel suolo non erano particolarmente levati (0,3 mg kg^{-1}), il riso bianco delle varietà Baldo e Gladio ottenuto dalle piante cresciute in condizioni DRY superano il limite massimo per il commercio del prodotto fissato a 0,2 mg kg^{-1}(CODEX STAN 193–1995 2009); nelle altre due varietà i livelli di Cd si attestano di poco al disotto del limite massimo. Le condizioni DRY e FLD garantiscono la sicurezza del prodotto relativamente ai suoi contenuti in Cd. Occorre sottolineare che se nel caso di Fe, Zn e Mn le concertazioni tali metalli nel riso bianco sono di molto inferiori a quelli del riso integrale, indipendente dalla gestione irrigua adotta, nel caso del Cd tali differenze sono di minor entità. Ciò probabilmente perché a differenza degli altri metalli microelementi o elementi in traccia che si accumulano nel pericarpo della cariosside, il Cd si distribuisce quasi uniformemente n tutte le diverse parti della cariosside.

La diversa disponibilità di azoto durane la crescita della coltura non influenza né i livelli assoluti né gli andamenti dei livelli sia nel riso integrale sia quello bianco degli elementi considerati in funzione della tipologia di condizione irrigua della risaia.

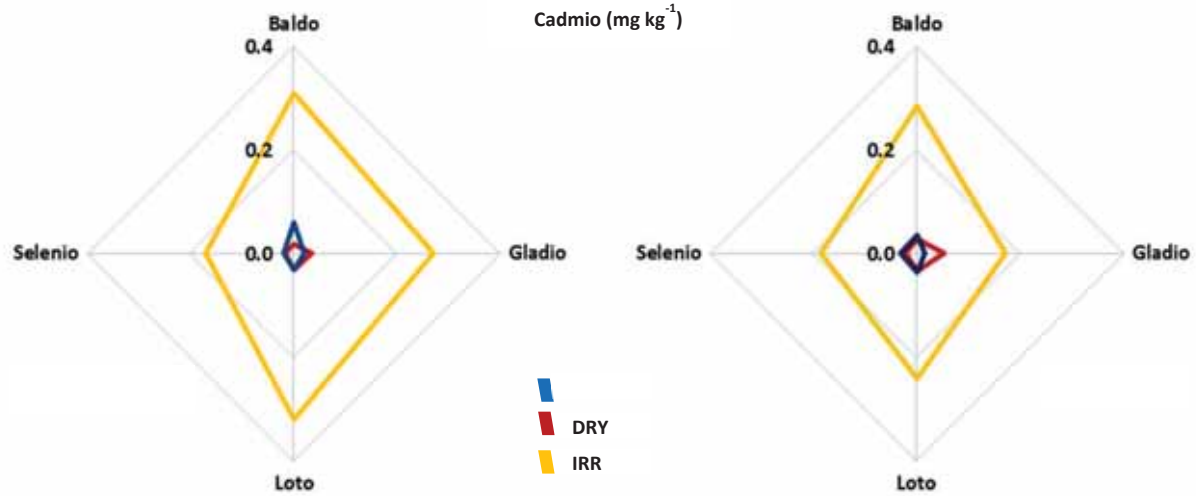


Figura 4.36. Concentrazione di Cd nel riso integrale e nel riso bianco delle 4 cultivar cresciute in condizioni di diversa gestione irrigua della risaia

La possibile introduzione nel breve periodo di una soglia limite per l'As da parte degli organi di vigilanza della Commissione Europea suggerisce la necessità di riservare una particolare attenzione ai livelli di tale elemento tossico nelle produzioni italiane anche se al momento risultano essere comunque estremamente bassi, soprattutto se riferiti ad alcune realtà europee ed extra-europee. La valutazione degli effetti delle diverse gestioni irrigue delle risaia, così come delle fertilizzazioni, sull'accumulo in granella dell'As potrebbe comunque fornire indicazioni operative utile al contenimento a livelli minimi di tale elemento nelle produzioni.

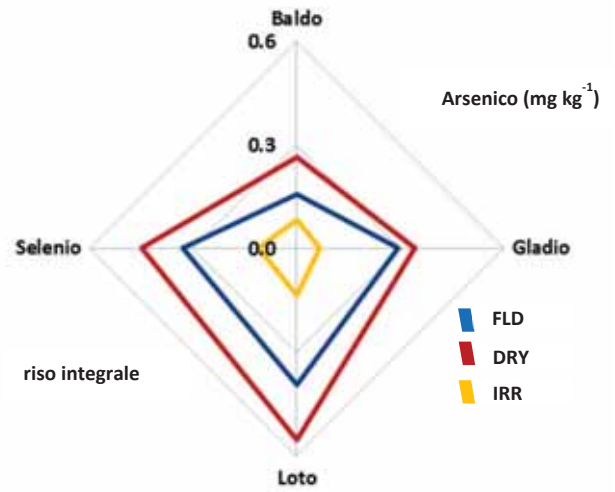


Figura 4.37. Concentrazione di As totale nel riso integrale delle 4 cultivar cresciute in condizioni di diversa gestione irrigua della risaia

Contrariamente a quante accade per il Cd, i livelli di As totale risultano più elevati nella granella integrale quando le piante crescono in condizioni di DRY o FLD, piuttosto che in condizioni di IRR. Tra le quattro cultivar analizzate Baldo mostra una tendenza a escludere l'As dalla cariosside superiore alle altre tre.
Una diversa disponibilità di N nel suolo non modifica né i livelli che l'As raggiunge nelle cariossidi né i loro andamenti in funzione della gestione irrigua. Occorre comunque sottolineare che i livelli complessivi di As

riportati in Figura 4.37, oltre a essere comunque bassi (l'elemento nel suolo è presente in concentrazioni minime, si vedano i Par. 3.1.1.2 e 3.1.2.2) si riferiscono al granello integrale; nel riso bianco tali livelli si riducano del 60-70% circa, poiché l'elemento è concentrato prevalente nella pula. I valori di potenziale redox del suolo nel caso della condizioni di FLD e DRY si mantengono negativi per gran parte del periodo di crescita, mentre nella condizione di IRR risultano quasi sempre positivi, tranne nei periodi immediatamente successivi agli interventi irrigui. Ciò giustifica i diversi comportamenti osservati per gli accumuli di Cd e di As in granella in funzione della gestione irrigua della risaia. Infatti, per il primo elemento i potenziali redox negativi del suolo favoriscono la sua associazione ai solfuri abbattendone la solubilità (Cattani et al., 2008), mentre l'As è presente nel suo stato di ossidazione ridotto - As(III) - cioè nella forma chimica più efficacemente assorbita dalle radici. Contrariamente, nei suoli aerobici il Cd è presente prevalentemente come solfato solubile e l'As nella sua forma ossidata -As(V)- che è assorbita con meno efficienza dalle radici soprattutto in presenza di livelli di fosfato adeguati.

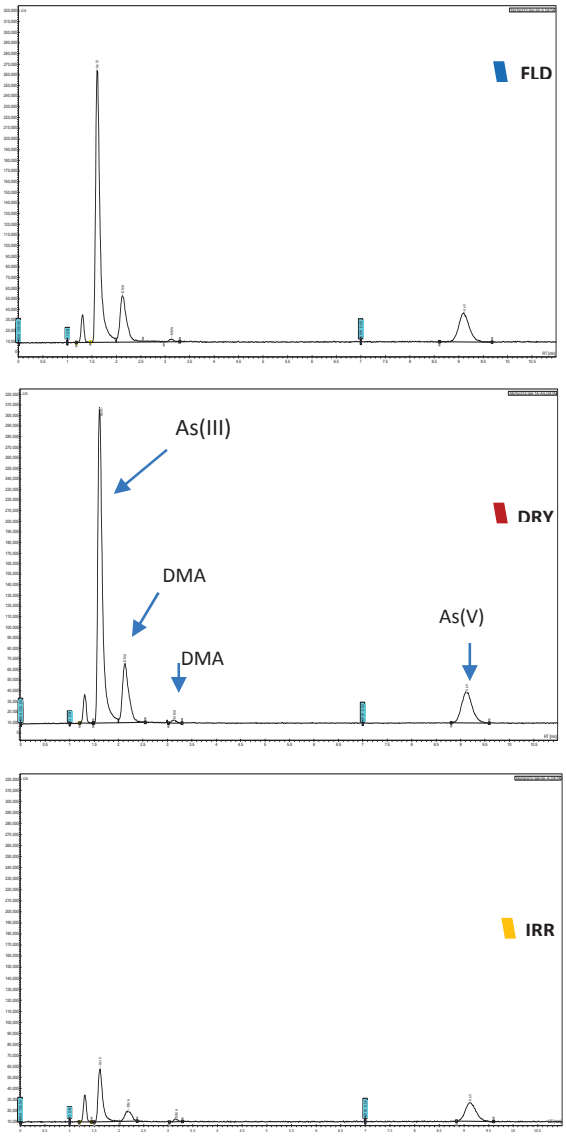


Figura 4.38. Profili HPLC-ICP-MS delle diverse forme molecolari di As presenti nella pula della varietà Selenio cresciuta in condizioni di diversa gestione irrigua della risaia

Occorre inoltre considerare che nei suoli anerobici, ad opera delle popolazioni microbiche presenti, l'As subisce reazioni di metilazione (Zhao et al., 2013) con formazione di forme organiche (MMA: ac. monometilarsonico; DMA: ac. dimetilarsinico). Anche queste forme organiche, per le quali è riconosciuta

una minor tossicità per l'uomo rispetto alle forme inorganiche, e soprattutto all'As(III) che è la forma più pericolosa, sono assorbite dalla pianta di riso e si accumulano in granella. Ne deriva che una valutazione dei rischi per la salute dei consumatori derivanti dalla eventuale presenza di As in granella non può prescindere dalla determinazione delle forme chimiche dell'elemento presenti. Applicando una tecnica HPLC-ICP-MS è stato possibile osservare che (Figura 4.38) nella granella integrale delle piante cresciute, indipendentemente dalla tipologia di gestione irrigua, poco meno dell'80% dell'As riscontrabile è presente in forma inorganica, As(III) o As(V), e le due forme organiche nel loro insieme contribuisco al 20% del contenuto totale. La più alta concentrazione di As totale osservata nella granella delle piante cresciute in condizione DRY rispetto a quella determinata dopo la crescita in condizioni di FLD può trovare spiegazione o in una diversa dinamica temporale della concentrazione nella soluzione circolante del suolo delle forme dell'elemento più assorbili dalla pianta o a un diverso sviluppo dell'apparato radicale nelle due condizioni. Chiarire questo aspetto può rivelarsi importante per di adottare di caso in caso l'agrotecnica più adeguata, soprattutto qualora le scelte aziendali siano rivolte a produzioni di granella per alimenti specifici indirizzati ai consumatori più giovani (*baby food*). Per queste produzioni infatti è molto probabile che nel caso dell'introduzione da parte delle Autorità competenti di una regolamentazioni per i livelli ammissibili di As essi siano, per queste produzioni, particolarmente bassi.
La definizione delle dinamiche di accumulo del Cd e dell'As nelle piante durante la fase di maturazione della coltura (antesi - raccolta) può fornire utili informazioni se considerate in relazione a eventuali scelte di gestione irrigua. Come si osserva in Figura 4.39 (i dati si riferiscono alla cv Baldo, ma gli andamenti sono del tutto simili nel caso delle altre tre varietà) il Cd nella condizione IRR si accumula progressivamente nella foglia bandiera dalla maturazione lattea della cariosside sino a quella cerosa, mentre nel caso delle condizioni FLD e DRY, oltre a essere molto più bassa, la concentrazione dell'elemento non varia significativamente lungo tutto il periodo. L'As invece, nelle due condizioni DRY e FLD continua ad accumularsi nella foglia bandiera quasi linearmente dall'antesi alla maturazione fisiologica.

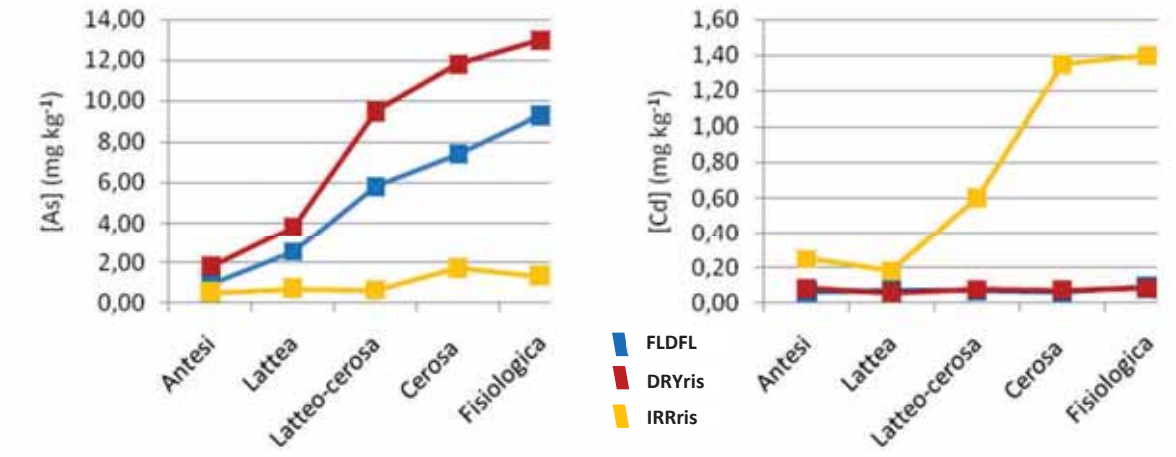


Figura 4.39. Andamento delle concentrazioni di As e Cd nelle foglie bandiera durante la fasi di maturazione delle cariossidi in funzione della gestione idrica della risaia

4.4.2 Analisi metaboliche

La vitamina E è un importante costituente della dieta dell'uomo nel quale rafforza il sistema immunitario e riduce il rischio dell'instaurarsi di alcune patologie degenerative (Bramley et al. 2000). La vitamina E è costituta dall'insieme di otto molecole con struttura di tococromanolo raggruppabili in due classi la prima costituita da quattro tocoferoli (TF; isomeri α, β, δ o γ) con catena laterale satura e la seconda da quattro tocotrienoli (TT; isomeri α, β, δ o γ) con catena laterale polisinsatura. Tra gli otto isomeri le due forme α sono quelle più facilmente assorbite dal corpo umano e quindi sono assumono maggior valore nutrizionale

(Sheppard et al*.,* 1993).In generale il γ-tocoferolo è l'isomero predominante nei semi, mentre l'α-tocoferolo è quello più abbondante nelle foglie (Zhang et al., 2013).
In alcune specie monocotiledoni itocotrienolisono la forma di Vitamina E presente nei semi. In particolare, nella cariosside di riso i tocotrienoli rappresentano il 60% della quantità totale di vitamina E e gli iosmeri α e ϒ sono i più abbondanti mentre gli isomeri β- and δ- così come il β-tocotrienolosono presenti in tracce (Britz et al. 2007; Heinemann et al. 2008; Shin et al. 1997; Zhang et al. 2012). Pe questa ragione questi tre isomeri spesso non sono considerati e, quindi, come totale dei tocoferoli è considerata la somma degli isomeri α e γ, mentre come totale dei tocotrienoli è considerata la somma degli isomeri α, γ e δ.
Poiché diversi fattori ambientali e genetici influenzano i livelli totali di vitamina E, così come i rapporti tra le sue diverse componenti, è stata valutata la possibilità che le condizioni di IRR e di FLD potessero incidere diversamente sul contenuto di questo gruppo di molecole. Come riportato in Tabella 4.17, al di là di qualche variazione statisticamente significativa, anche se di lieve entità, tra i livelli dei singoli isomeri, le granelle integrali ottenute dalle piante cresciute nelle due diverse condizioni irrigue contengono livelli di vitamina E totale assolutamente paragonabili. In nessun caso, né il genotipo, né le condizioni di aereazione del suolo favoriscono i contenuti degli isomeri α, cioè quelli più importanti per la dieta dell'uomo, rispetto agli altri.
Le stesse conclusioni possono essere tratte per quel che concerne il γ-orizanolo, l'altra classe di molecole lipofiliche a valore nutraceutico contenute nella pula del riso. Infatti, nessuna evidente differenza è osservabile né tra i diversi genotipi né tra le diverse condizioni irrigue. Riferendosi al contenuto totale in olio della pula una certa tendenza ad un accumulo maggiori di tale componente sembra verificarsi nelle condizioni di FLD e in presenza di una minor disponibilità di N per le piante. Anche in questo caso tuttavia gli effetti sono di media o lieve entità in funzione del genotipo.

Tabella 4.17. Effetto della crescita in condizioni di IRR e FLD sui livelli delle diverse componenti della vitamina E e sui livelli di γ-orizanolo nella pula di riso

	mg kg^{-1} DW															
	Baldo				**Gladio**				**Loto**				**Selenio**			
	IRR		FLD		IRR		FLD		IRR		FLD		IRR		FLD	
	+N	-N	+N	-N	+N	-N	+N	-N	+N	-N	+N	-N	+N	-N	+N	-N
α-TF	40,4	43,8	44,6	39,8	37,3	39,6	34,6	38,6	31,2	39,6	31,2	38,1	34,5	37,7	32,6	38,0
γ-TF	10,3	8,3	13,4	7,6	8,6	8,3	13,4	7,6	3,1	3,2	3,3	3,4	4,6	4,4	4,2	4,5
Tot.	***50,7***	***52,1***	***58,0***	***47,4***	***45,9***	***47,9***	***48,0***	***46,2***	***34,3***	***41,8***	***34,5***	***41,5***	***39,1***	***42,1***	***36,8***	***42,5***
α-TT	55.3	54,9	49,6	46,8	40,6	41,5	46,0	41,0	49,8	63,7	40,7	41,7	58,7	53,5	55,3	56,2
γ-TT	99,3	95,3	98,3	92,7	92,4	102,3	108,2	100,6	99,5	113,0	83,1	84,0	99,5	83,1	113,0	89,4
δ-TT	8,0	6,5	8,3	6,2	5,1	7,4	5,2	6,5	9,7	9,3	7,6	6,3	5,2	4,9	3,7	3,7
Totale	***162,6***	***156,7***	***156,2***	***145,7***	***138,1***	***151,2***	***159,4***	***148,1***	***159,0***	***186,0***	***131,4***	***132,0***	***163,4***	***141,5***	***172,0***	***149,3***
Vit. E	***213,3***	***208,0***	***214,2***	***193,1***	***184,0***	***199,1***	***207,4***	***194,2***	***193,3***	***227,8***	***165,9***	***173,5***	***202,5***	***183,6***	***208,8***	***191,8***
γ-oriz	2,1	2,2	2,1	1,9	2,2	2,3	2,4	2,1	2,8	2,4	3,2	2,4	2,6	2,3	2,3	2,4

I dati sono la media di 3 campioni per parcella (n=12). Per i tocotrienoli ES mai superiore a 11%; per i tocoferoli ES mai superiore a 9%

4.4.3 Mappe metabolomiche

I risultati dello studio condotto attraverso GC-MS sui metaboliti della frazione polare delle pule di 4 cultivar cresciute in condizioni di FLD o IRR, indicano che nonostante la presenza di alcuni tratti comuni, la risposta al diverso regime di allevamento risente in modo rilevante delle peculiarità varietali. In particolare, a fronte della cultivar Baldo, la cui pula isolata dalle cariossidi crescite in IRR mostra livelli inferiori di una serie di metaboliti di interesse rispetto a quella isolata dalle cariossidi cresciute in FLD, in Loto tali diferenze sensibilmente ridotte se non inesistenti. Il quadro biochimico generato ha permesso di evidenziare quali tratti del metabolismo primario risultano maggiormente influenzati del regime idrico adottato durante la crescita. In particolare in Baldo, l'allevamento in condizione IRR determina una forte riduzione di alcune molecole del metabolismo azotato, quali glutammato, glutammina, acido γ-amminobutirricoe acido aspartico. Allo stesso tempo si osserva in forte incremento nei livelli di arginina, amminoacido considerato marker per cultivar di riso a bassa efficienza d'uso dell'acqua.

Questi risultati (schematizzati in forma *Mapman* nel caso di Baldo; Figura 4.40) sono una base interessante su cui fondare valutazioni circa l'adattabilità delle cultivar italiane a condizioni di IRR oltre che fornire indicazioni per pianificare gestioni irrigue della risaia in grado di favorire in pula l'accumulo di molecole d'interesse farmaceutico o più in generale industriale.

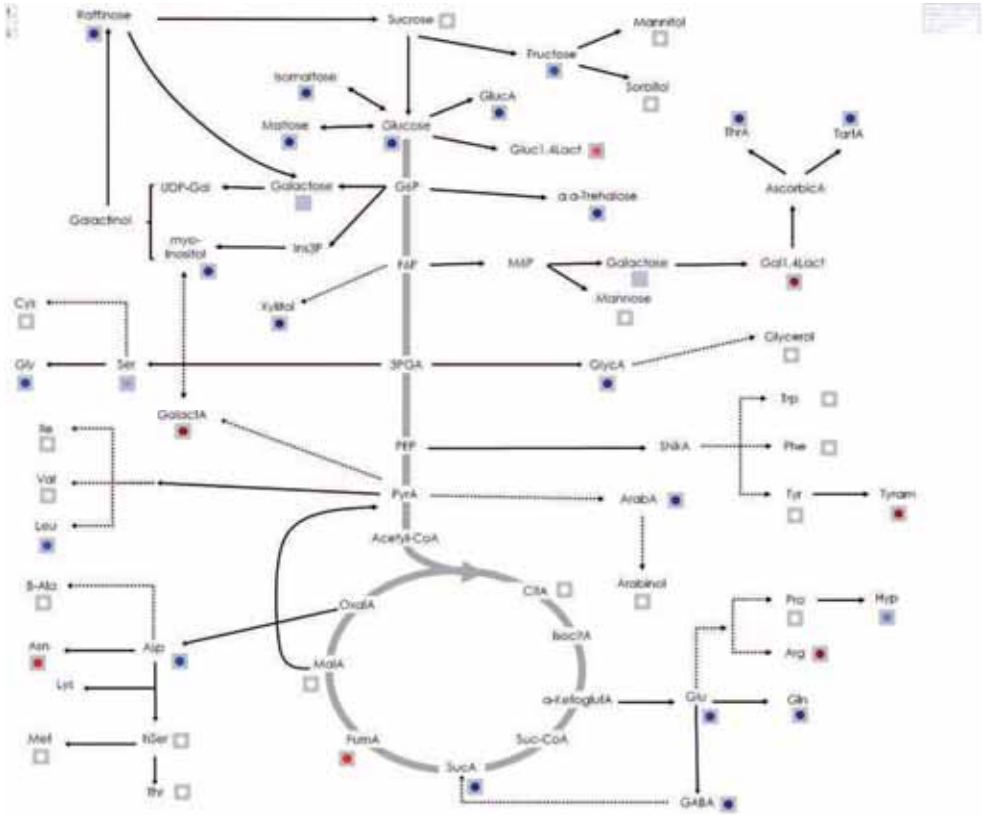


Figura 4.40.Schema Mapman dei metaboliti del metabolismo primario identificati attraverso analisi GC-MS in Baldo. In rosso i metaboliti i cui livelli sono superiori in allevamento aerobio, in blu i metaboliti con livelli ridotti in allevamento aerobico

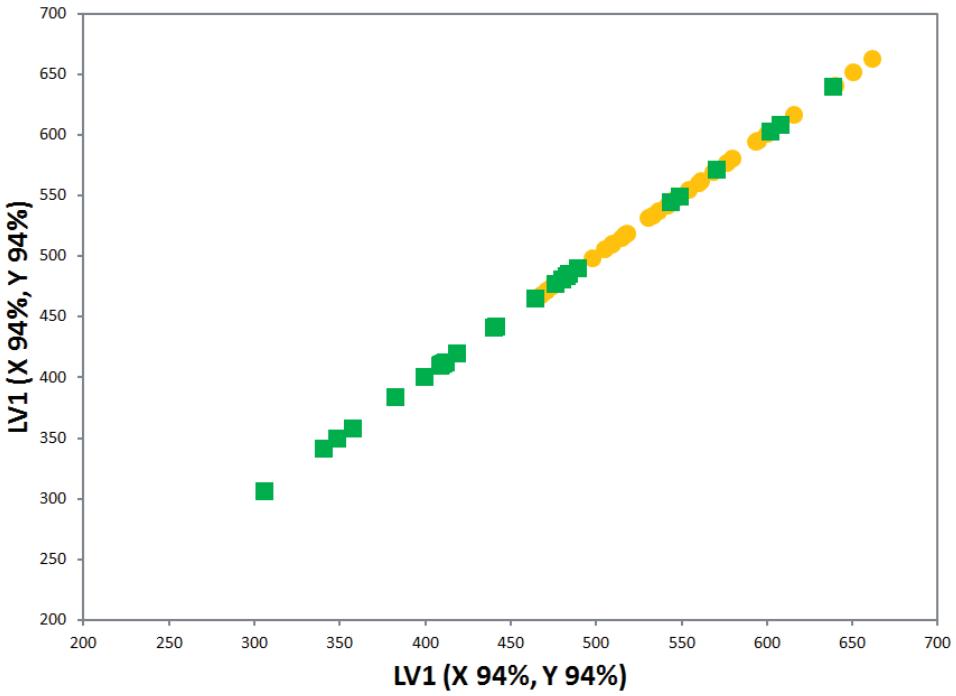


Figura 4.41. Regressione tra il set degli elementi minerali e i livelli di α-tocoferolo.

4.5 Aspetti molecolari

4.5.1 Sviluppo di sistemi innovativi per la selezione di varietà di riso ad elevata efficienza d'uso dell'acqua e tolleranti la riduzione nella disponibilità idrica: controllo dell'attività stomatica

4.5.1.1 Analisi in silicio ed identificazione dei geni candidati

La sequenza proteica di regolatori noti dell'attività stomatica in Arabidopsis è stata utilizzata per identificare nel genoma di riso i putativi geni ortologhi. A partire dalla proteina di Arabidopsis AtMYB60, già identificata come regolatore trascrizionale delle risposte stomatiche allo stress (Cominelli et al., 2005), sono stati isolati membri omologhi della famiglia di geni MYB di riso (Figura 4.44) avvalendosi delle ampie conoscenze oggi disponibili a proposito del proteoma di questa specie. I confronti di sequenza hanno consentito di identificare i geni di riso LOC_Os11g03440 (putativo ortologo di AtMYB60), LOC_Os08g33940 (putativo ortologo di AtMYB30), LOC_Os02g41510 (putativo ortologo di AtMYB15) e LOC_Os04g43680 (putativo ortologo di AtMYB60). Lo studio delle relazioni filogenetiche tra le diverse proteine, effettuato attraverso il loro allineamento, ha prodotto l'albero riportato in Figura 4.42 (inserto) dal quale si evidenzia una certa divergenza tra le proteine MYB60 di Arabidopsis e vite e il prodotto genico di LOC_Os11g03440 di riso.

4.5.1.2 Analisi di espressione dei geni candidati

Il movimento stomatico si realizza attraverso una complessa rete di eventi che prevedono tra l'altro la regolazione dell'espressione di una serie di geni più o meno mediata da variazioni di concentrazione intracellulare delle forme attive dell'ormone vegetale acido abscissico (ABA). La possibilità di entrare nel dettaglio di queste fenomeni è vincolata alla capacità di distinguere ciò che accade nelle cellule di guardia rispetto all'insieme di cellule della foglia. Applicando la tecnica *laser microdissection,* utilizzando membrane termoplastiche adese a sezioni istologiche di foglie di riso si è proceduto ad isolare in modo non invasivo le cellule di guardia dal resto del tessuto. Sulle cellule così isolate si è poi proceduto all'estrazione di RNA ed

alla sua analisi. I risultati riportati in Figura 4.43 si riferiscono ai geni più simili a *AtMYB60*. In particolare per *Os11g03440,* il putativo ortologo di *AtMYB60,* è evidenziabile una moderata espressione preferenziale nelle cellule di guardia piuttosto che nella foglia intera e, soprattutto, una risposta opposta a quella di *AtMYB60* in seguito all'esposizione ad ABA (Figura 4.43). Infatti se l'espressione di *AtMYB60* risulta repressa dai trattamenti con ABA, quella di *Os11g03440* risulta invece stimolata (Figura 4.43A).Diversamente, il gene *Os02g41510* risulta spesso prevalentemente nelle celle di guardia e il livello del suo trascritto cresce sensibilmente in seguito a trattamenti con ABA (Figura 4.43C). I geni *Os08g33940* e *Os04g43680* non hanno invece espressione preferenziale nelle cellule di guardia (Figura 4.4)

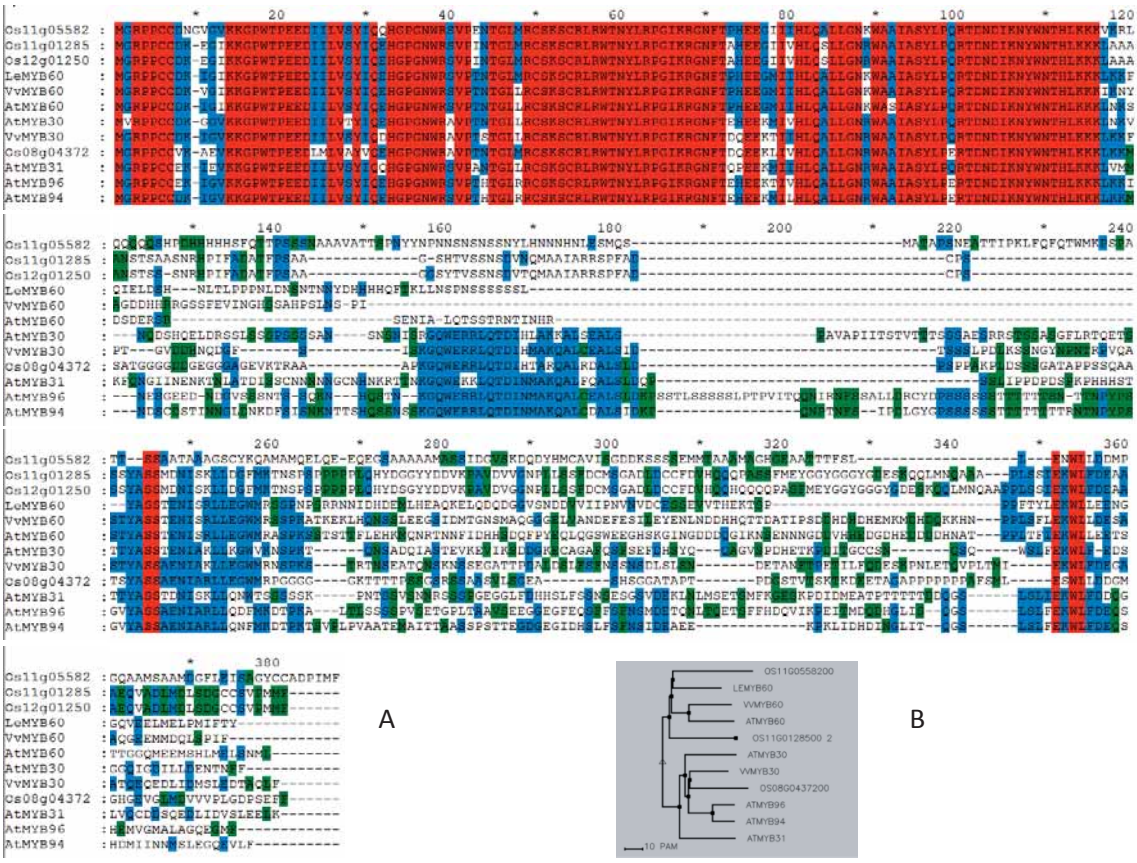


Figura 4.42. Identificazione dei putativi ortologhi di *AtMYB60* nel genoma di riso. A) allineamento della proteina AtMYB60 con le proteine MYB più simili di riso (Os), pomodoro (Le) e vite (Vv). B) albero filogenetico

4.5.1.2 Analisi di espressione dei geni candidati

Il movimento stomatico si realizza attraverso una complessa rete di eventi che prevedono tra l'altro la regolazione dell'espressione di una serie di geni più o meno mediata da variazioni di concentrazione intracellulare delle forme attive dell'ormone vegetale acido abscissico (ABA). La possibilità di entrare nel dettaglio di queste fenomeni è vincolata alla capacità di distinguere ciò che accade nelle cellule di guardia rispetto all'insieme di cellule della foglia. Applicando la tecnica *laser microdissection,* utilizzando membrane termoplastiche adese a sezioni istologiche di foglie di riso si è proceduto ad isolare in modo non invasivo le cellule di guardia dal resto del tessuto. Sulle cellule così isolate si è poi proceduto all'estrazione di RNA ed alla sua analisi. I risultati riportati in Figura 4.43 si riferiscono ai geni più simili a *AtMYB60*. In particolare per *Os11g03440,* il putativo ortologo di *AtMYB60,* è evidenziabile una moderata espressione preferenziale nelle cellule di guardia piuttosto che nella foglia intera e, soprattutto, una risposta opposta a quella di *AtMYB60* in seguito all'esposizione ad ABA (Figura 4.43). Infatti se l'espressione di *AtMYB60* risulta repressa dai

trattamenti con ABA, quella di *Os11g03440* risulta invece stimolata (Figura 4.43A). Diversamente, il gene *Os02g41510* risulta spesso prevalentemente nelle celle di guardia e il livello del suo trascritto cresce sensibilmente in seguito a trattamenti con ABA (Figura 4.43C). I geni *Os08g33940* e *Os04g43680* non hanno invece espressione preferenziale nelle cellule di guardia (Figura 4.4)

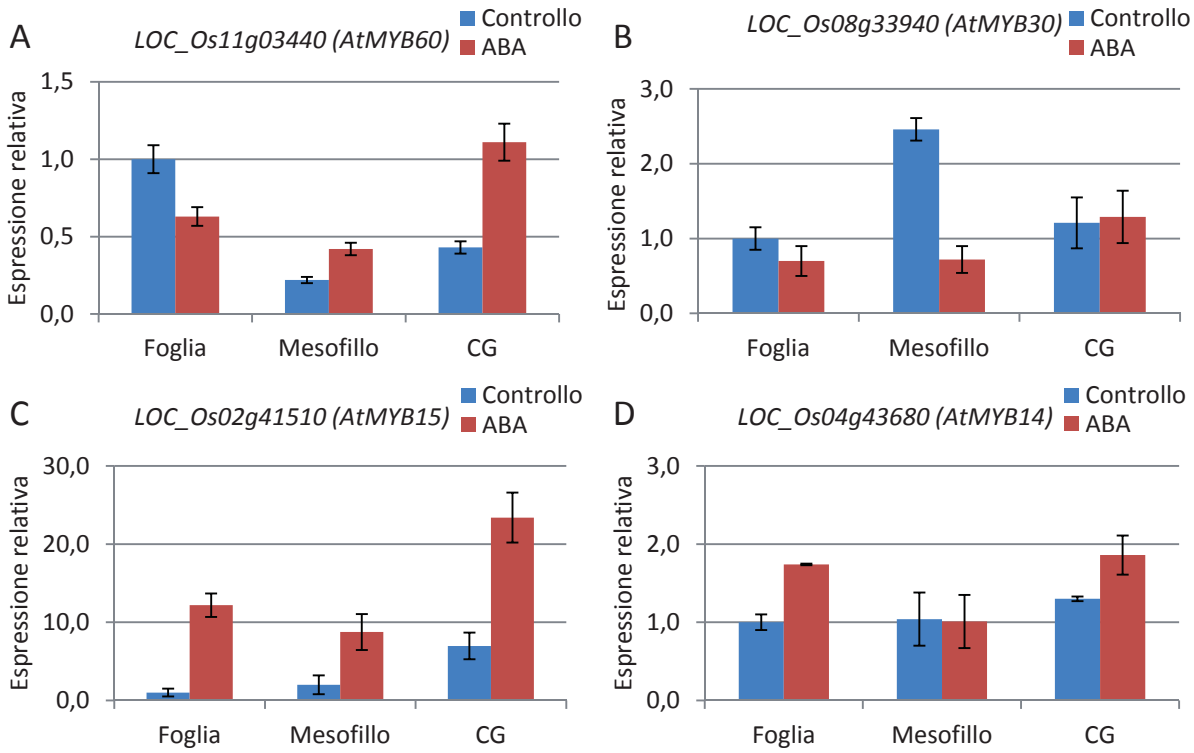


Figura 4.43. Analisi di espressione dei geni candidati in risposta al trattamento con ABA in foglie intere, cellule di mesofillo e cellule di guardia purificate tramite microdissezione. I valori di espressione sono stati normalizzati utilizzando il gene *OsActin*

4.5.1.3 Analisi e validazione di promotori stoma-specifici

L'espressione specifica di un gene in un gruppo particolare di cellule e l'entità della sua trascrizione sono stabilite da una complessa rete di interazioni molecolari che in ultima analisi sono definite da tratti di sequenze nucleotidiche comprese nel promotore del gene stesso. Attraverso la verifica degli effetti sulla specificità cellulare e/o sulla entità della trascrizione del gene di delezioni successive del promotore è possibile individuare tali sequenze regolatrici. Nel caso del *promotore di AtMYB60* è stata identificata una regione di 262 bp a monte del codone di inizio della trascrizione che costituisce la sequenza minima per garantire la trascrizione sito-specifica del gene. L'analisi bioinformatica effettuata a carico di tale regione ha permesso di rilevare la presenza al suo interno di un certo numero di motivi [T/A]AAAG, propri del sito di legame al DNA di fattori di trascrizione di tipo DOF. La mutagenesi sito-specifica di questi motivi DOF, singolarmente o in combinazione, ha confermato la loro essenzialità nel guidare l'espressione di *AtMYB60* negli stomi (Cominelli et al., 2011).

Al fine di valutare la possibilità che la regione regolativa 1,3 kb di *AtMYB60*o la sequenza di 262 bp in essa contenuta sufficiente per guidarne l'espressione sito specifica del gene facciano parte di una rete regolativa presente anche in riso sono state generate linee transgeniche esprimenti il gene reporter GUS sotto il controllo del promotore *full lenght* di *AtMYB60 o* della sua sequenza minima in grado di conferirgli attività (rispettivamente linee $AtMYB60_{pro}$*1.3kb:GUS e*$AtMYB60_{pro}$*262bp:GUS*).Come risulta evidente nelle Figure 4.46A 4.46B, l'analisi delle linee transgeniche T1 e T2 di riso non ha evidenziato espressione del reporter nelle cellule di guardia degli stomi in entrambi i casi. La presenza effettiva del transgene nelle linee T1 di

riso generate (Rusconi et al., 2013) e il fatto che la trasformazione con gli stessi costrutti di piante di tabacco e di vite al contrario mostrano una forte e specifica attivazione del gene reporter GUS negli stomi di tali piante portano alla conclusione che nelle cellule di guardia del riso è assente un network regolativo mediato da *MYB60* e che con ogni probabilità l'espressione genica negli stomi di questa specie sia mediata da elementi regolativi diversi dai siti DOF riscontrati nel promotore di *AtMYB60*.

Tale conclusione ha spinto allo studio sistematico delle sequenze regolatrici dei geni MYB identificai come preferenzialmente espressi in cellule di guardia rispetto a mesofillo e foglia intera. A questi si sono aggiunti anche altri fattori di trascrizione appartenenti ad altre famiglie geniche, quali *Os03g60080*, appartenete alla famiglia NAC, la cui espressione è risultata selettivamente up-regolata in cellule di guardia in risposta ad ABA (Figura 4.44C). Le regioni dei putativi promotori di tali geni (in media circa 2 kb) sono state isolate e clonate a monte di geni reporter (GUS e/o GFP) e i costrutti così ottenuti sono stati usati per la trasformazione di Arabidopsis e riso. Dall'analisi di tali linee ci si propone di ottenere indicazioni utili alla definizione del network regolativo dei movimenti stomatici in riso.

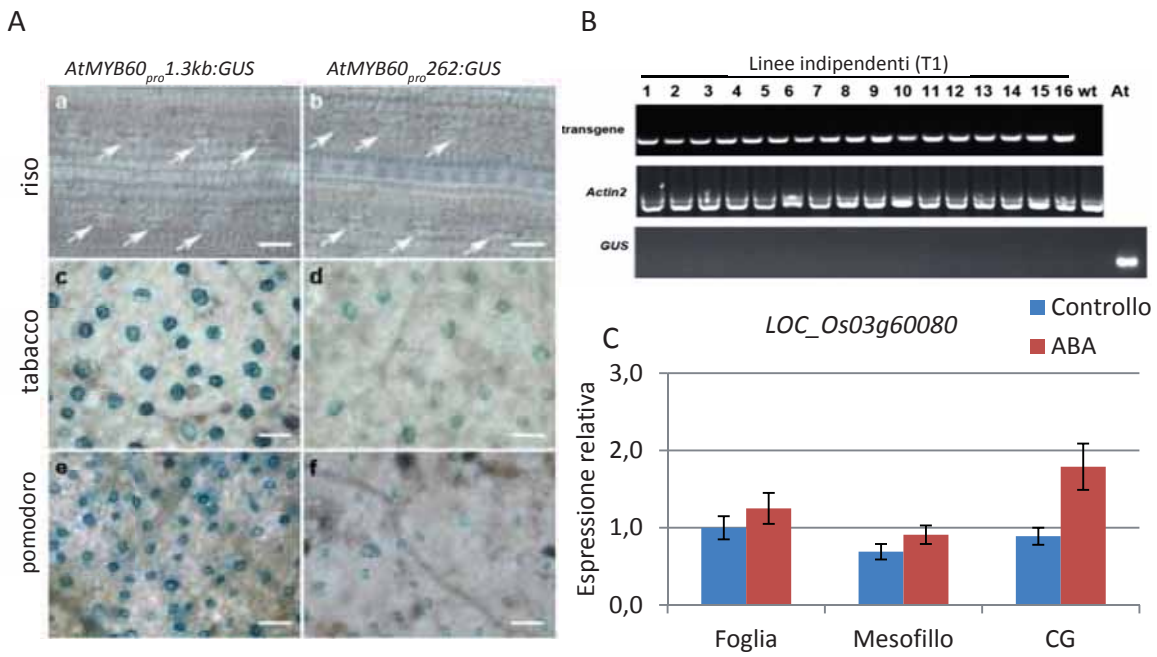


Figura 4.44. Analisi dei promotori stoma-specifici. A) piante di riso, tabacco e pomodoro trasformate con il costrutto*AtMYB60pro1.3kb:GUS* o *AtMYB60pro262bp:GUS*. Le frecce bianche indicano gli stomi nella foglia di riso. B) analisi molecolare di 16 linee indipendenti di riso (T1) che mostrano la presenza del transgene e l'assenza di espressione del reporter GUS. Una linea di Arabidopsis (At) esprimente GUS è stata usata come controllo positivo. C) espressione del gene Os03g60080 in foglia, mesofillo e cellule di guardia in risposta alla somministrazione di ABA

4.5.2 Risposte geniche alle alte temperature: approccio di RNA-sequencing

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal sequenziamento degli mRNA (*RNA-seq*) estratto da pistilli di riso della varietà più sensibile (N22) si è potuto stabilire che durante l'impollinazione l'esposizione delle piante anche per soli 30 minuti ad una temperature relativamente elevata (38 °C) determina forti cambiamenti nel trascrittoma dei pistilli impollinati. In particolare la trascrizione di ben 630 geni risulta modulata diversamente rispetto a quanto riscontrabile nelle piante controllo mantenute a 29 °C. Questi dati, contengono elementi chiave per comprendere che cosa renda questa varietà così resistente al caldo, e come il suo polline riesca a germinare normalmente in condizioni che per le altre varietà sono limitanti se

non proibitive. Tra i 630 elementi la cui trascrizione risulta modificata per effetto delle alte temperature si annoverano geni che codificano per:

1) fattori di trascrizione essenziali per regolare, in un meccanismo "a cascata", l'espressione di tutti gli altri geni necessari per la risposta cellulare allo stress termico;
2) probabili "chaperones" molecolari; queste sono proteine che appartengono a famiglie diverse, i cui membri svolgono un ruolo comune e di vitale importanza nella protezione dalla denaturazione delle proteine e dei complessi proteici, in condizioni di shock termico; molte di queste proteine sono note come "Heat Shock Proteins" (HSPs);
3) enzimi coinvolti nella sintesi delle cere e cutine epicuticolari necessarie per proteggere i tessuti dai fenomeni di disidratazione possibili in condizioni di elevata temperatura;
4) enzimi implicati nella sintesi di ormoni;
5) enzimi implicati nei sistemi di detossificazione dei radicali liberi, composti estremamente dannosi per le cellule che si formano in maggior quantità in condizioni di stress termico.

Tra questi 630 geni, 46 sono stati riconosciuti di particolare interesse e quindi la loro trascrizione è stata analizzata anche nelle varietà sensibili N22 6264 e IR64 e nella varietà altamente sensibile Moroberekan ripetendo su questi genotipi il trattamento di stress termico in tutte queste varietà, e valutandone l'espressione mediante PCR quantitativa, in stami maturi, pistilli maturi non impollinati e pistilli impollinati, sia in situazione di controllo e a 38°C. I risultati ottenuti hanno permesso di individuare alcuni geni interessanti. In particolare la trascrizione di un gene che codifica per una particolare *chaperonina* ad attività isomerasica, risulta fortemente indotto nella varietà tollerante N22 dalle alte temperature. La sua trascrizione è invece indotta in misura sensibilmente inferiore minore in alcune delle varietà sensibili, e in altre la sua sequenza nucleotidica presenta invece importanti polimorfismi di singolo nucleotide, che si ripercuotono nella sequenza amminoacidica della proteina codificata. Quest'ultima osservazione presuppone la necessità di verificare se tali polimorfismi si ripercuotono in qualche modo sull'attiva dell'enzima che il gene codifica. E' particolarmente interessante notare come il gene in questione risulti localizzato nel cromosoma IV di riso vicino a un QTL (Quantitative Trait Locus) associato alla tolleranza al caldo, precedentemente identificato in N22 (Ye et al., 2012).

Un secondo gene alquanto interessante è risultato codificare per la chaperonina HSP101, di fondamentale importanza e altamente conservata nelle piante (Gurley, 2000). Questo gene è fortemente indotto dallo stress da alte temperature, specialmente nelle antere. Tra le diverse varietà di riso analizzate è emersa l'esistenza a proposito di questo gene di variazioni amminoacidiche molto interessanti in un dominio conservato della proteina quindi probabilmente in un tratto essenziale per la sua attività. La craterizzazione funzionale di questi fattori potrà in un prossimo futuro rilevarsi molto interessante.

4.6 Ruolo della componente microbica

Durante il progetto si è proceduto alla caratterizzazione della comunità microbica coltivabile associata alle colture di riso varietà Baldo, in quanto nota per la sua maggior resistenza allo stress idrico. Lo studio di microrganismi mediante coltivazione e isolamento permette di approfondire le conoscenze circa le potenzialità metaboliche, permettendo così di caratterizzare e selezionare ceppi batterici con attività di promozione della crescita vegetale per lo sviluppo e la formulazione di inoculi batterici specifici da applicare in campo.

La frazione endofita (E) e quella rizosferica (R) di piante di riso Baldo coltivate secondo la pratica agricola "semina e crescita in asciutta" e sottoposte (+N) o meno (-N) a trattamenti con concimazione azotata, sono

state usate come inoculo per il protocollo di arricchimento per attività ACC-deaminasica. Sono state quindi selezionate 50 colonie batteriche per frazione, generando una collezione batterica di 190 isolati.
La collezione microbica è stata de-replicata attraverso un'analisi ITS-PCR che suddivide i ceppi batterici in base alla specie/sottospecie. Il numero di profili ITS presenti in una frazione può essere pertanto considerato un indicatore della biodiversità in essa presente. La frazione endofita è quella con la minore diversità intrinseca, con 3 profili differenti in entrambe le tesi colturali analizzate. La rizosfera costituisce invece la frazione più ricca dal punto di vista della biodiversità batterica: l'abbondanza degli essudati radicali rappresenta infatti un'importante fonte nutrizionale per la crescita microbica. Sono stati riscontrati 18 diversi profili ITS dalla frazione del suolo rizosferico trattato con azoto rispetto agli 11 presenti nella frazione senza azoto. Queste osservazioni sono state confermate anche dall'analisi filogenetica degli isolati. In particolare, l'identificazione degli isolati a livello di genere e l'analisi della loro distribuzione (Tabella 1 e Figura1) ha evidenziato come la concimazione o meno del suolo con azoto abbia modellato profondamente la comunità microbica associata ai tessuti radicali e al suolo rizosferico.

Tabella 4.18. Caratterizzazione della collezione batterica. Numero di generi e di individui presenti nella collezione di isolati, e valori degli indici di diversità calcolati sulla base della distribuzione dei generi batterici ritrovati.

Indici di diversità	Endofiti		Rizosfera		Totali	
	(-N)	(+N)	(-N)	(+N)	(-N)	(+N)
Genus	1	1	4	10	2	11
Individuals	53	51	41	40	104	81
Dominance	1	1	0,63	0,22	0,50	0,32
Simpson	0	0	0,37	0,78	0,50	0,68
Shannon	0	0	0,73	1,81	0,69	1,51
Evenness	1	1	0,52	0,61	1,00	0,41

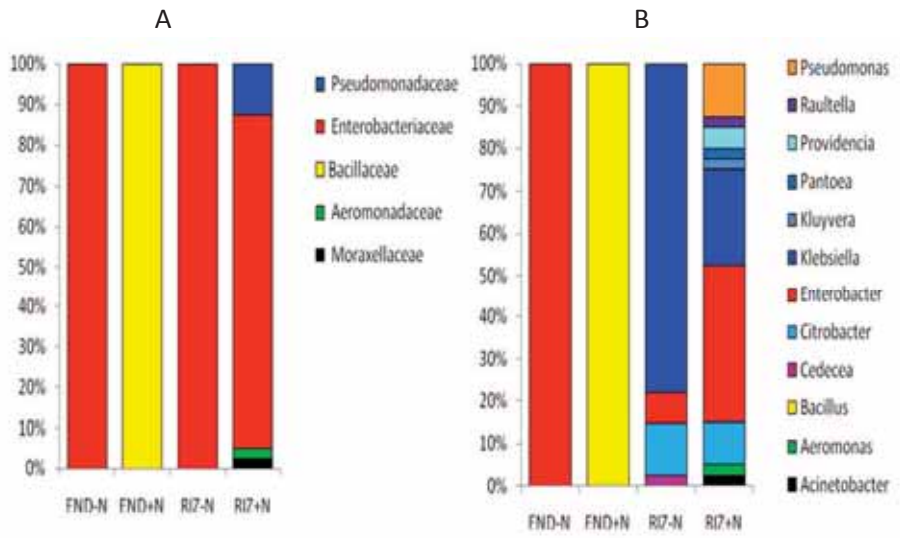


Figura 4.45. Caratterizzazione filogenetica dei batteri isolati. Distribuzione filogenetica delle (A) famiglie e dei (B) generi microbici all'interno della collezione batterica con attività ACC deamminasica isolata da piante di riso cresciute in asciutta in terreni concimati o meno con azoto

Le piante di riso cresciute in suolo non concimato con azoto (-N) sono caratterizzate dalla presenza esclusiva di ceppi appartenenti alla famiglia delle *Enterobacteriaceae*, sia nella frazione endofita che in quella rizosferica, mostrando indici di biodiversità (indice di *Shannon*) molto bassi (Tabella 1). Tuttavia, pur

appartenendo alla stessa famiglia, generi differenti sono presenti nelle due frazioni. Nello specifico, gli isolati endofiti sono affiliati filogeneticamente al genere *Enterobacter*, mentre nella rizosfera compaiono anche i generi *Klebsiella* e *Citrobacter*.

Al contrario, nelle piante di riso sottoposte a concimazione azotata (+N) si riscontra una maggiore diversità microbica (Tabella 1), in questo caso la diversità del microbioma che colonizza l'endosfera rispetto a quello della rizosfera è evidente già a livello di famiglia. Gli isolati endofiti sono infatti tutti affiliati al genere *Bacillus* appartenente alla famiglia delle *Bacillaceae*, come precedentemente osservato in piante di riso coltivate in risaia ed in microcosmi (Mano et al., 2007; Padgham and Sikora, 2007). Questo genere microbico è assente dalla frazione rizosferica, costituita da isolati appartenenti ai generi *Klebsiella,Citrobacter*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas* e *Aeromonas*(Figura 1). Recenti studi confermano questi risultati mostrando come piante di riso coltivate in diverse aree geografiche e sottoposte a diverse pratiche agricole siano colonizzate da batteri affiliati a questi generi (Sun et al., 2008; Cottyn et al., 2001).

Come evidenziato dalla distribuzione dei generi microbici, la concimazione con azoto ha un drastico effetto sulla struttura della comunità microbica coltivabile endofita con attività ACC-deaminasica: in suoli con un basso apporto di azoto gli endofiti appartengono esclusivamente al genere *Enterobacter* mentre in suoli concimati con azoto gli endofiti sono affiliati esclusivamente al genere *Bacillus*. Al contrario il trattamento con azoto non ha forti ripercussioni sulla struttura della comunità rizosferica con attività ACC-deaminasica: la famiglia delle *Enterobacteriaceae* è presente in entrambe le frazioni, ma si osserva una maggiore diversità microbica nel suolo rizosferico concimato con azoto.

I ceppi identificati sono stati quindi sottoposti ad uno screening tramite saggi *in vitro* per valutarne le potenzialità di promozione della crescita vegetale. I risultati dello screening evidenziano come il 59% dei batteri sia dotato di attività PGP multiple ed i ceppi endofiti del genere *Enterobacter*, isolati da piante di riso cresciute in assenza di concimazione azotata, siano quelli che presentano tutte e quattro le attività saggiate. La solubilizzazione del fosfato inorganico è effettuata dalla quasi totalità degli isolati (93,7%), attestandosi come la proprietà PGP più rappresentata nella collezione, seguita dalla sintesi di auxine (59,4% dei ceppi) e da sintesi di siderofori ed esopolisaccaridi (50% dei ceppi ciascuna). Una significativa frazione degli isolati (40,6%), dimostra possedere 3 attività PGP contemporaneamente e tali ceppi sono affiliati principalmente ai generi *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Pantoea*. Il 34,3% degli isolati presenta invece solo due attività PGP risultando affiliati principalmente ai generi *Pseudomonas*, *Raoultella*, *Bacillus* e *Citrobacter*.

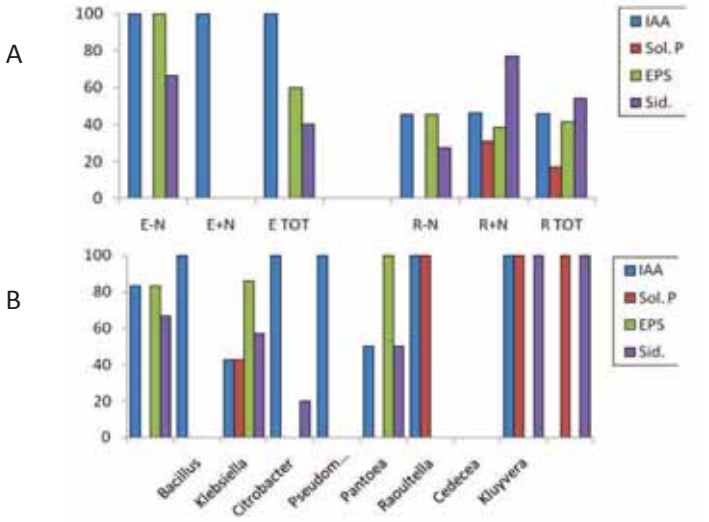


Figura 4.46. Distribuzione delle attività PG. Percentuali di isolati che hanno mostrato attività PGP in vitro nelle (A) diverse frazioni e nei (B) diversi generi batterici. IAA, produzione di auxine; Sol. P, solubilizzazione del fosfato inorganico; EPS, produzione di esopolisaccaridi; Sid, produzione di siderofori.

4.7 Aspetti economici

4.7.1 Gestione delle superfici aziendali

I risultati espressi dal modello mostrano come le ripartizioni ottimali delle superfici aziendali tra le diverse tipologie di gestione della risorsa, presentino differenze progressivamente più marcate al variare delle condizioni di fornitura (Figura 4.47; Tabella 4.19).

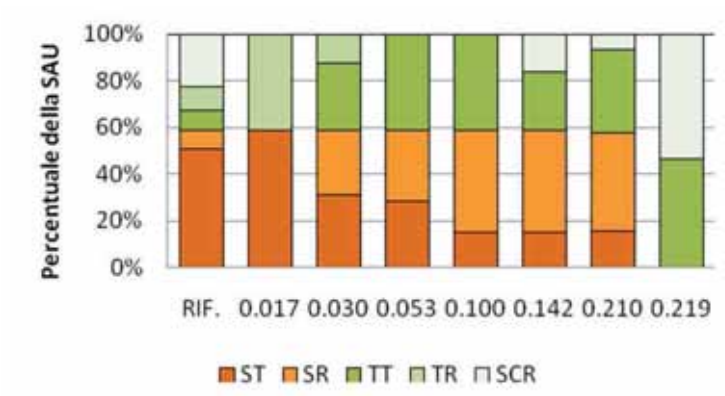


Figura 4.47. Gestione ottimale delle superfici in presenza delle diverse tariffe considerate

Occorre precisare che il canone di 0,017 € m^{-3} è il corrispondente volumetrico dell'attuale tariffa applicata; l'ottimizzazione in riferimento all'una od all'altra restituisce, dunque, il medesimo risultato. In entrambi i casi perciò, la massimizzazione del margine tende a favorire, per la dispensa continua, la semina in acqua a scapito di quella interrata; al contrario, per la consegna turnata, viene privilegiata la tecnica a minor consumo idrico.

Un incremento nell'importo della tariffa di fornitura determina una progressiva diminuzione della conduzione tradizionale (Tabella 4.19), a favore della sommersione ritardata, ma non sembra invece favorire il risparmio idrico in corrispondenza della modalità di erogazione discontinua. Il valore di 0,142 € m^{-3} rappresenta la soglia minima al di sopra della quale l'ottimizzazione restituisce la possibilità di adottare la gestione *"SCR"*, non favorita in precedenza. Per tariffe superiori a 0,210 € m^{-3} si determina invece una diminuzione complessiva delle superfici coltivate: se da una parte le medesime superfici a dispensa turnata si distribuiscono in maniera differente tra le tipologie gestionali, quelle rifornite in maniera continua diminuiscono in valore assoluto. Ciò suggerisce che il valore imposto determina l'annullamento dei margini lordi per alcune aziende che ricorrono alla sommersione continua, indicando che in questo caso i costi di fornitura da sostenere sarebbero troppo alti per fronteggiare gli elevati volumi idrici richiesti (Figura 4.49). Analogamente, ed in maniera ancor più evidente, al raggiungimento del valore della tariffa di 0,219 € m^{-3} provoca un collasso del sistema evidenziato da una drastica diminuzione delle superfici coltivate (-64% rispetto al caso precedente e -65% rispetto al riferimento), che in questo caso si distribuirebbero unicamente tra le tipologie gestionali possibili per la dispensa turnata. In tal caso, le aziende che si affidano ad una consegna continua si troverebbero costrette a rivedere le proprie strategie gestionali, colturali e produttive. Soprattutto in questi ultimi scenari descritti, è evidente la forte incentivazione al risparmio idrico. La diversa allocazione delle superfici coltivate si accompagna infatti a volumi idrici distribuiti progressivamente minori (Tabella 4.19); inevitabilmente questa situazione si ripercuote sui valori medi di produttività tecnica ed economica, che crescono linearmente all'aumentare della tariffa applicata. In questo senso un deciso incremento si evidenzia con la tariffa più elevata, a fronte di una altrettanto decisa diminuzione delle quantità distribuite (-78% rispetto alla situazione di riferimento).

Tabella 4.19. Quadro riassuntivo in diverse condizioni tariffarie, a seguito della ripartizione ottimale delle superfici

	Riferimento	Tariffa volumetrica [€ m^{-3}]						
		0,017	0,030	0,053	0,100	0,142	0,210	0,219
Superficie a riso *[ha]*	**730**	**730**	**730**	**730**	**730**	**730**	**710**	**254**
Sommersione tradizionale (ST)	*369*	*431*	*226*	*205*	*110*	*110*	*110*	
Sommersione ritardata (SR)	*62*		*205*	*226*	*321*	*321*	*301*	
Turnata tradizionale (TT)	*60*		*209*	*299*	*299*	*183*	*253*	*118*
Turnata ritardata (TR)	*75*	*299*	*90*					
Scorrimento ritardata (SCR)	*164*					*116*	*46*	*136*
Acqua dispensata *[L s^{-1} ha^{-1}]*	**4**	**4**	**4**	**4**	**4**	**4**	**4**	**4**
Acqua distribuita *[m^3 ha^{-1}]*	**15.897**	**17.031**	**15.087**	**14.797**	**14.372**	**13.835**	**13.567**	**3.542**
Produttività tecnica *[g kg^{-1}]*	**0,59**	**0,57**	**0,64**	**0,65**	**0,66**	**0,67**	**0,68**	**2,49**
Produttività economica *[€ m^{-3}]*	**0,19**	**0,95**	**1,06**	**1,07**	**1,10**	**1,11**	**1,13**	**4,12**
Costo dell'irrigazione *[€ m-^{3}]*	**0,063**	**0,058**	**0,077**	**0,101**	**0,149**	**0,193**	**0,262**	**0,412**
approvvigionamento da consorzio	*0,018*	*0,017*	*0,030*	*0,053*	*0,100*	*0,142*	*0,210*	*0,219*
gestione aziendale	*0,045*	*0,041*	*0.047*	*0,048*	*0,049*	*0,051*	*0,052*	*0,193*
Costo dell'irrigazione *[€ ha^{-1}]*	**999**	**989**	**1.163**	**1.496**	**2.141**	**2.671**	**3.554**	**1.459**
approvvigionamento da consorzio	*279*	*279*	*453*	*786*	*1,437*	*1,967*	*2,849*	*776*
gestione aziendale	*720*	*711*	*711*	*710*	*704*	*704*	*705*	*683*

4.7.2 Performances economiche

In virtù della tipologia tariffaria corrente, il costo sostenuto dalle aziende per l'approvvigionamento dell'acqua irrigua (costo di fornitura) è direttamente proporzionale alla superficie irrigata ed indipendente dal quantitativo di acqua resa effettivamente disponibile ed utilizzabile.

A parità di condizioni iniziali ed al variare della sola tariffa, si registrano unicamente incrementi nei costi di fornitura, (Tabella 4.21), che a loro volta incidono in egual misura su quelli totali connessi alla pratica irrigua; la componente relativa alla gestione si mantiene invece costante.

Analizzando le superfici associate alle modalità di gestione dell'acqua che consente di massimizzare il margine lordo, al variare della tariffa i costi totali connessi alla pratica irrigua aumentano progressivamente ed in maniera significativa, fino a che le superfici complessive non diminuiscono sensibilmente (Tabella 4.20 e Figura 4.48). Per tariffe superiori a 0.053 € m^{-3} i costi di fornitura prevalgono su quelli di gestione nel determinare i costi totali (Figura 4.49); come già ricordato, con il livello tariffario più alto (0,219 € m^{-3}) i costi totali crollano in ragione del fatto che gran parte della superficie non viene messa a coltura. In tali condizioni il costo per metro cubo è il più alto tra quelli restituiti nei diversi casi (Tabella 4.19).

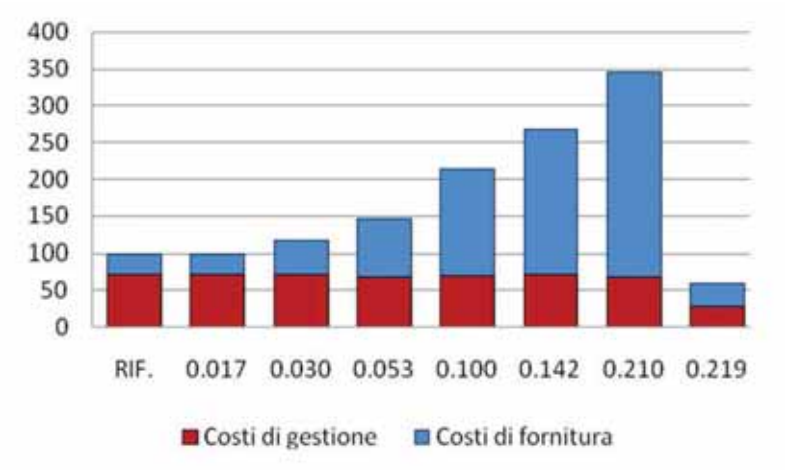


Figura 4.50. Costi di irrigazione nei diversi scenari ottimizzati (RIF. = 100)

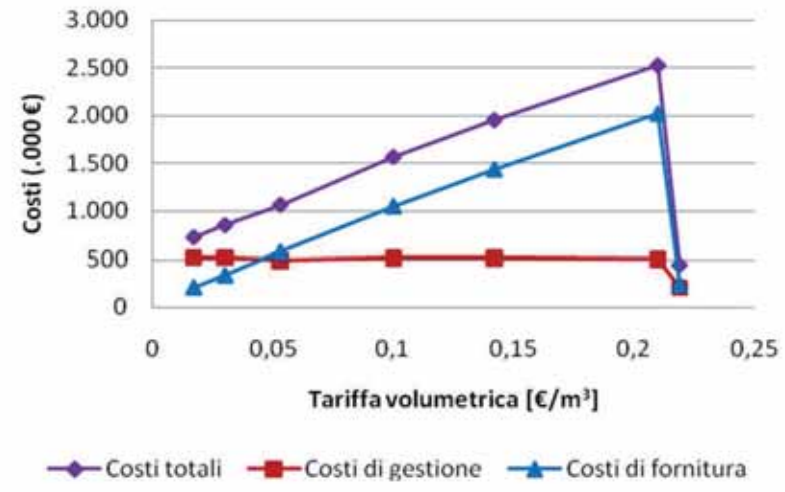


Figura 4.51. Andamento congiunto dei costi al variare della tariffa volumetrica imposta

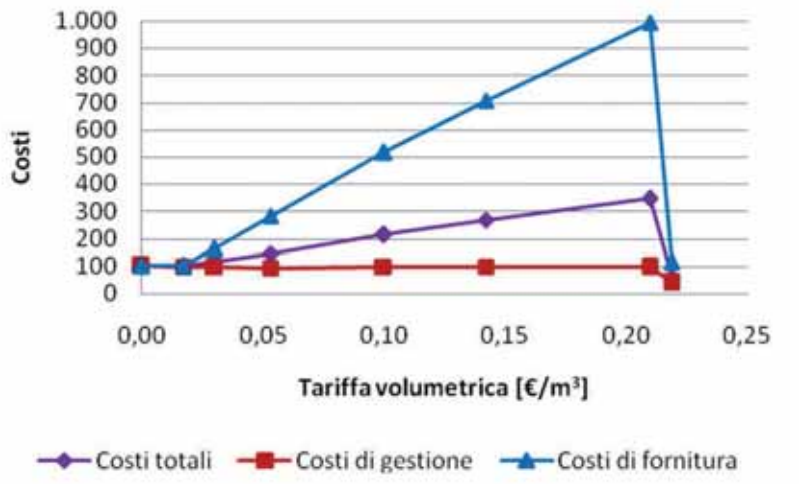


Figura 4.52. Andamento dei singoli costi al variare della tariffa volumetrica (RIF. = 100)

I ricavi che le aziende realizzano nelle diverse condizioni non dipendono dalla tipologia tariffaria. Poiché infatti il modello non influisce sul prezzo, ma piuttosto sulle superfici coltivate, variazioni nei ricavi sono associate unicamente al decremento delle superfici complessive.

I margini lordi medi mostrano dunque un andamento coerente con i trend relativi alle sue due componenti, sia nella situazione attuale che in condizioni ottimali. Come già descritto, un deciso cambiamento in valore assoluto è associato ad una tariffa volumetrica progressivamente maggiore, che si ripercuote principalmente sui costi di fornitura, soprattutto per quelle gestioni che richiedono grandi quantitativi di risorsa. In questo caso un margine negativo potrebbe comportare, la scelta della non coltivazione dei fondi oppure più semplicemente la diversificazione colturale e l'adozione di strategie per ridurre i consumi, e con essi i costi di approvvigionamento idrico.

I volumi distribuiti fanno registrare andamento simile (Tabella 4.20). Dal confronto dei due trend è dunque possibile stimare il valore di *trade-off* per ogni scenario rispetto alla situazione di riferimento: si distinguono tre diverse situazioni, così come di seguito sintetizzato (Tabella 4.22). Per tariffe comprese tra 0,030 e 0,219 € m^{-3} si osserva una diminuzione del margine per ogni unità di risorsa risparmiata, mentre la tariffa più alta sembrerebbe l'unica in grado di garantire margini positivi in corrispondenza di un più spinto risparmio idrico; tuttavia occorre tener presente che questo stesso livello comporta effetti economici negativi per alcune aziende.

Tabella 4.20. Costi ottimali di irrigazione nelle diverse condizioni tariffarie e variazione percentuale (Δ) rispetto alle condizioni di riferimento

	Riferimento	Tariffa volumetrica [€ m^{-3}]													
		0,017	Δ	0,03	Δ	0,05	Δ	0,10	Δ	0,142	Δ	0,21	Δ	0,219	Δ
Fornitura [€]	**203.393**	**203.393**	**0**	**330.395**	**+ 62**	**573.869**	**+ 182**	**1.049.176**	**+ 416**	**1.436.121**	**+ 606**	**2.022.781**	**+ 895**	**231.900**	**+ 14**
ST	*102.811*	*120.085*		*152.063*		*243.162*		*228.704*		*325.218*		*480.279*			
SR	*17.274*			*128.589*		*250.934*		*670.314*		*953.186*		*1.320.132*			
TT	*16.717*	*83.307*		*21.958*											
TR	*20.897*			*27.785*		*79.773*		*150.158*		*114.030*		*148.327*		*154.684*	
SCR	*45.694*									*43.687*		*74.043*		*77.216*	
Gestione [€]	**525.477**	**518.719**	**- 1**	**518.361**	**- 1**	**488.225**	**- 7**	**513.854**	**- 2**	**513.854**	**- 2**	**500.357**	**- 5**	**204.270**	**- 61**
ST	*275.055*	*314.464*		*167.061*		*151.569*		*81.077*		*81.077*		*81.078*			
SR	*46.021*			*147.403*		*162.399*		*228.520*		*228.520*		*215.022*			
TT	*41.040*	*204.255*		*61.560*											
TR	*52.699*			*142.697*		*204.257*		*204.257*		*125.498*		*112.118*		*112.131*	
SCR	*110.661*									*78.759*		*92.139*		*92.139*	
Totali [€]	**728.870**	**722.111**	**- 1**	**848.756**	**+ 16**	**1.062.094**	**+ 46**	**1.563.030**	**+ 114**	**1.949.975**	**+ 168**	**2.523.138**	**+ 246**	**436.170**	**- 40**
ST	*377.866*	*434.549*		*319.124*		*394.731*		*309.781*		*406.295*		*561.357*			
SR	*63.296*			*275.632*		*383.333*		*898.834*		*1.181.706*		*1.535.154*			
TT	*57.757*	*287.562*		*83.518*											
TR	*73.596*			*170.482*		*284.030*		*354.415*		*239.528*		*260.445*		*266.815*	
SCR	*156.355*									*122.446*		*166.182*		*169.355*	

Tabella 4.21. Costi di fornitura a confronto nei diversi scenari ipotizzabili e variazione percentuale rispetto alle condizioni attuali

		Tariffa volumetrica [€ m^{-3}]													
		0,017	Δ	0,030	Δ	0,053	Δ	0,100	Δ	0,142	Δ	0,210	Δ	0.219	Δ
Costi di fornitura [€]															
Situazione di riferimento	203.393														
a parità di altre condizioni		203.393	**0**	348.148	**+ 71**	616.525	**+ 203**	1.160.494	**+ 471**	1.650.221	**+ 711**	2.437.035	**+ 1.098**	2.541.480	**+ 1.150**
Ottimizzati		203.393	**0**	330.395	**+ 62**	573.869	**+ 182**	1.049.176	**+ 416**	1.436.121	**+ 606**	2.022.781	**+ 895**	231.900	**+ 14**

Tabella 4.22. Trade-off nei diversi scenari ottimali

Tariffa [€ m^{-3}]		**Trade-off [€ m^{-3}]**
0,017	**Il margine non varia anche con l'aumento dei consumi**	**0**
0,030	**Il margine diminuisce al diminuire dei consumi idrici**	**- 0,20**
0,053		**- 0,41**
0,100		**- 0,75**
0,142		**- 0,81**
0,210		**- 0,92**
0,219	**Il margine aumenta al diminuire dei volumi idrici**	**- 0,004**

5. Conclusioni

La peculiare capacità di adattamento della pianta di riso a diversi condizioni ambientali, sia aerobiche che di totale saturazione idrica, ha consentito la messa a punto di sistemi di coltivazione diversificati in termini di gestione dell'acqua di irrigazione. Tali sistemi costituiscono un'alternativa alla tradizionale sommersione continua e negli ultimi decenni si sono diffusi a livello mondiale ed anche in Italia.

Per consentire un'opportuna pianificazione territoriale ed aziendale delle tecniche e indirizzare l'attività risicola verso forme di conduzione maggiormente sostenibili in termini di effetti sull'agro-ambiente, è però necessario valutare tutte le possibili ricadute, positive e negative, di tali tecniche. Proprio per caratterizzare e investigare i diversi agrosistemi che si instaurano con le diverse gestioni irrigue, e segnatamente quella di sommersione tradizionale, quella di sommersione ritardata alla 3ª-4ª foglia e quella aerobica, che nell'ambito del progetto BIOGESTECA sono state condotte estese sperimentazioni, le cui conclusioni più rilevanti sono di seguito riportate.

5.1 Aspetti agronomici, produttivi e ambientali

La sperimentazione iniziata sui campi del ENR di Castello D'Agogna (PV) nel 2011, ha permesso di trarre alcune indicazioni sulle potenzialità produttive e su importanti aspetti ambientali dei sistemi alternativi di gestione dell'acqua in risaia.

Si è innanzitutto osservato che le tecniche di semina in acqua e di semina interrata e successiva sommersione in 3° - 4° foglia, sono risultate altamente efficaci. Dal punto di vista dell'incidenza delle diverse componenti della produzione sulla resa in granella, tuttavia, si sono stati evidenziati comportamenti diversificati. La semina in acqua si è sempre distinta per un elevato investimento finale di culmi per unità di superficie, mentre nella semina interrata e sommersione posticipata ha svolto un ruolo più importante il numero di spighette per pannocchia. Tale differenza è in parte ascrivibile alla capacità della pianta di compensare le basse densità di investimento rilevate nella semina interrata anche a causa della limitata emergenza dei germinelli quando si ha formazione sul terreno dicrosta superficiale, con allungamenti maggiori della pannocchia. Più in generale, si ritiene che le condizioni della semina "ordinata" (fila-interfila) della semina interrata, permettano la differenziazione di un numero più elevato di spighette all'interno di ogni singola pannocchia. Ulteriore elemento che condiziona le migliori performance delle componenti della produzione espresse dalla tecnica con sommersione posticipata nella seconda parte del ciclo colturale (n° di spighette per pannocchia, peso di 1000 semi), può essere identificato nella minor influenza negativa di sostanze tossiche per la pianta (S^{--}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, AGV) prodotte in situazioni di suolo asfittico.

La gestione ad irrigazioni turnate, che comporta l'instaurarsi di condizioni aerobiche per tutto il ciclo colturale, è risultata nel 2012 la meno produttiva. Il divario rispetto alle altre tecniche nella resa in risone è risultato addirittura maggiore nei trattamenti senza apporto di concime azotato. Le colture hanno anche risentito di maggiori stress ambientali, che hanno portato ad una più marcata influenza della Piriculariosi (in particolare per Gladio), ed un minore sfruttamento della fertilità residua per effetto di una limitata espansione dell'apparato radicale. A livello varietale, il genotipo meno adatto alla tecnica in asciutta è stato Gladio, mentre Selenio e Loto sono risultati i meno penalizzati.

La qualità merceologica ha evidenziato limitati effetti della diversa gestione irrigua sui valori di resa in grani interi e sulla presenza di difetti nelle diverse varietà oggetto di studio. Analogamente l'efficienza d'uso dell'azoto, che si è attestata su percentuali di recupero del nutriente da parte della pianta molte buone, non ha mostrato effetti rilevanti in relazione ai diversi sistemi di coltivazione. Ciò può probabilmente essere messo in relazione con l'adeguato frazionamento del nutriente, che deve adeguarsi ai sistemi di irrigazione al fine di ridurre al minimo le perdite nell'ambiente.

Un effetto significativo delle tre tecniche ha riguardato la composizione e la densità delle malerbe infestanti. La semina tardiva e gli interventi meccanici e/o chimici effettuati in pre-semina hanno sicuramente contribuito ad abbassare la pressione infestante. Tuttavia, la semina in acqua si è confermata come una gestione caratterizzata da una popolazione infestante tipica dei sistemi acquatici, con il predominare di *A. coccinea, H. reniformis* e *S. mucronatus*. Le semine interrate, ed in modo particolare la conduzione in asciutta, hanno invece favorito l'insediamento di *E. cruss-galli* e di altre Graminacee e, tra dicotiledoni, *A. theophrasti* e *P. lapathifolium*. Occorre sottolineare come, nel caso delle irrigazioni turnate, la mancanza della coltre d'acqua non abbia permesso una certa azione di contenimento della germinazione e della crescita di specie non tipicamente acquatiche e come l'efficacia degli interventi erbicidi abbia risentito negativamente della fluttuazione dello stato idrico del suolo.

Il trasferimento di azoto alle acque superficiali è stato di modesta entità in tutti i trattamenti irrigui ed in entrambi gli anni di sperimentazione, A tal proposito è stata persino evidenziata un'attività depurante da parte della risaia per quanto riguarda la concentrazione di nitrati registrata nelle acque in ingresso ad inizio stagione 2012. Per quanto riguarda il trasferimento di nutrienti verso la falda, è stata osservata l'assoluta protezione della conduzione in sommersione continua dalla percolazione di nitrati verso la falda freatica, riscontrando un lieve innalzamento nei valori di ammonio, anche in profondità, solo in prossimità delle prime concimazioni (2011). La semina interrata seguita da sommersione in 3° - 4° foglia ha mostrato un certo rischio di lisciviazione di entrambe le forme di azoto analizzate, successivamente alla concimazione di pre-sommersione. Nella fase di asciutta, i valori più elevati di concentrazione sono da imputarsi anche alla minor diluizione dei soluti in condizione di limitata riserva idrica nel suolo. La coltivazione con irrigazioni turnate è stata valutata come la più suscettibile alla contaminazione delle acque profonde da nitrati. I valori registrati nelle fasi iniziali, con particolare riferimento all'intervento di concimazione in accestimento del 2012, hanno, infatti, riportato valori prossimi a 50 mg di N l^{-1}. Un'opzione che potrebbe essere raccomandata per ridurre i rischi di lisciviazione da nitrati nei sistemi di gestione in aerobiosi è rappresentata dall'utilizzo di fertilizzanti addizionati con inibitori della nitrificazione, già dimostrati come efficaci nel prolungare l'azione nutritiva del fertilizzante.

Concludendo, i risultati mostrano come l'adozione dell'una o dell'altra gestione offra la possibilità di una valorizzazione del risultato produttivo in funzione di specifiche condizioni pedo-colturali. La coltivazione con semina in asciutta e sommersione in 3° - 4° foglia è sicuramente più adattabile a situazioni di terreno molto sciolto e bibulo, mentre è penalizzata in presenza di affioramenti in superficie di acque sotterranee o provenienti da giacenze confinanti (risaie, corsi d'acqua). Consente un controllo pressoché totale della proliferazione di alghe ed annulla il problema di danni ai germinelli causato da fermentazioni dei residui colturali. Per effetto di un apparato radicale molto più espanso, la semina in asciutta conferisce una maggior resistenza agli stress idrici, che potrebbero intervenire nella seconda parte del ciclo colturale in situazioni di carenza idrica.

La disponibilità di due tecniche così differenziate per le condizioni edafiche che ne derivano, può anche essere considerata una risorsa rivolta ad un migliore e più razionale utilizzo dei mezzi di produzione ed all'introduzione di criteri di lotta integrata alle avversità, come evidenziato nel caso delle malerbe.

Occorre, però, definire un adeguato approccio tecnico-operativo ai differenti sistemi di coltivazione. Il programma di frazionamento della concimazione azotata, le manovre dell'acqua di sommersione, il rispetto delle condizioni di asciutta della prima fase del ciclo, nel caso della tecnica che le prevede, e le modalità della semina interrata (profondità di semina, costipamento del suolo) sono elementi fondamentali per il successo agronomico ed ambientale delle coltivazioni. A tal proposito, un esempio evidente riguarda l'opportunità di un frazionamento differenziato tra la semina in acqua e quella con sommersione posticipata della dose totale di azoto. Mentre con il primo il fertilizzante somministrato in pre-semina ed interrato con l'erpicatura risulta protetto dall'attività di batteri nitrificanti, in assenza della sommersione la

produzione di nitrati è senza dubbio di maggiore entità. Ne deriva, in questo caso, l'esigenza di un incremento della frazione da distribuirsi in accestimento ed una considerevole riduzione della quota applicata in pre-semina.
La gestione ad irrigazioni turnate è risultata senza dubbio la meno produttiva e la più problematica per gli aspetti ambientali considerati. La limitata espressione di tutte le componenti della produzione, molto probabilmente conseguente alle difficoltà nella crescita e nella funzionalità degli apparati radicali, le più elevate necessità di interventi fitoiatrici per il controllo delle avversità e la maggior suscettibilità alla contaminazione dell'acqua da nitrati, evidenziano la limitata espandibilità territoriale della tecnica.

5.2 Aspetti idraulico-agrari

Quando si intende valutare l'effetto della gestione irrigua sull'efficienza di uso dell'acqua da parte del riso, particolare attenzione deve essere prestata alla scala spaziale a cui viene condotta l'analisi. Considerazioni diverse possono infatti essere formulate a seconda che ci si riferisca al singolo campo o a una scala spaziale più ampia (sistema di risaie, comprensorio irriguo).
Ad oggi sono pochi gli studi condotti a scala di comprensorio irriguo, soprattutto nel caso di tecniche di coltivazione del riso caratterizzate da un potenziale di risparmio idrico. Se da un lato è possibile dimostrare, con rilievi sperimentali a scala di campo, le alte efficienze irrigue dei metodi *water-saving*, soprattutto in presenza di una falda freatica molto vicina al piano campagna, dall'altro una conversione massiccia dei metodi irrigui può portare alla riduzione dei flussi di percolazione e dunque all'abbassamento del livello di falda, provocando una riduzione dello stesso potenziale di risparmio idrico di queste tecniche. D'altro canto, le tecniche più tradizionali, che prevedono la coltivazione del riso in sommersione, sono caratterizzate da indici di efficienza ridotti quando considerate alla scala di campo, che tuttavia possono crescere notevolmente alla scala di distretto o di comprensorio irriguo. L'acqua infiltrata ad inizio stagione, infatti, consente di rimpinguare la falda freatica, i cui livelli consentiranno poi di ridurre le perdite per percolazione nel corso della stagione. Le portate irrigue che raggiungono la falda, inoltre, non sono perse quando si considera un sistema territoriale ampio, poiché alimentano le portate erogate dai fontanili e innescano processi di risorgenza delle acque sotterranee nell'alveo dei corsi d'acqua.
Queste considerazioni assumono una particolare rilevanza da quanto è emerso dalle attività di misura e modellazione matematica condotte alla scala di campo negli anni 2012 e 2013. Esse hanno infatti evidenziato una forte interdipendenza dei consumi idrici - e dunque dell'efficienza irrigua - dei diversi metodi di coltivazione del riso dalla soggiacenza della falda freatica. In particolare, nel 2012 quando la soggiacenza era più elevata, l'efficienza irrigua dei trattamenti in sommersione (tradizionale e ritardata) si è attestata attorno a 0,2, mentre nel 2013, con una riduzione della soggiacenza di circa 15 cm in media, l'efficienza irrigua dei trattamenti in sommersione è raddoppiata. Con tutta evidenza, alla riduzione della soggiacenza ha concorso l'effetto locale prodotto dall'esteso appezzamento a valle delle parcelle sperimentali che ha ospitato soia irrigata per scorrimento nel 2012 e riso in sommersione nel 2013.
Confrontando poi le efficienze del sistema di coltivazione del riso tradizionale e con sommersione ritardata, si ha un sostanziale pareggio, anche se il secondo sistema è caratterizzato da un'efficienza leggermente superiore (3% in media nei due anni). Differenze analoghe sono citate anche da altri autori.
Nel caso del riso aerobico il valore dell'efficienza irrigua è influenzato dalla particolare gestione degli adacquamenti. Infatti, per evitare ristagni prolungati di acqua dopo gli apporti irrigui e assicurare quindi le condizioni di aerobiosi, nella sperimentazione si è operato in modo da garantire un rapido scolo dell'acqua in eccesso. L'efficienza varia quindi in modo significativo a seconda che venga calcolata al lordo dei coli, o al netto di questi ultimi (supponendo, in questo caso, che essi siano riutilizzabili a scala di distretto). In ogni caso si attesta su valori decisamente più elevati rispetto alle gestioni con sommersione: risulta prossima all'unità se la si considera al lordo dei coli e, comunque, anche considerando il valore medio tra i due sopra

menzionati, è pari a circa 0,7 sia nel 2012 che nel 2013. Valori così alti testimoniano il forte effetto della falda a bassa soggiacenza, che riduce i flussi di percolazione e contribuisce al soddisfacimento del fabbisogno idrico della coltura tramite la risalita capillare.
Simulazioni modellistiche alla scala di campo per il riso aerobico, considerando un apparato radicale che si approfondisce fino alla suola d'aratura (40-45 cm) e soggiacenze di falda crescenti, dimostrano che l'influenza positiva della falda, sebbene diminuisca gradualmente al crescere della soggiacenza, rimane significativa fino a valori di soggiacenza di circa 1,5 m nei suoli limosi o franco-limosi, 1,0 m nei suoli franchi e 0,75 m nei suoli sabbiosi.
A scala di distretto irriguo, con riferimento ai risultati ottenuti per il distretto campione di San Giorgio di Lomellina (circa 1500 ha), si evidenzia come la sostituzione massiccia della sommersione continua con l'irrigazione intermittente produca una modifica sostanziale dei fabbisogni irrigui, con una significativa riduzione sia dei volumi complessivi stagionali, che dei volumi irrigui mensili (anche se in misura minore per i mesi in cui la richiesta irrigua è maggiore e, in particolare, per il mese di luglio). La conversione dei metodi renderebbe però necessaria una riorganizzazione gestionale e, in alcuni casi, anche infrastrutturale delle reti irrigue, dal momento che le aziende dovrebbero passare da una dotazione relativamente bassa dispensata in continuo (circa 2,5 l s ha^{-1}) a corpi idrici maggiori e consegnati sulla base di turni stabiliti in un calendario irriguo.
Effetti collaterali della riconversione che non sono stati indagati nel progetto ma che possono essere rilevanti, riguardano le ripercussioni causate dall'aumento della soggiacenza freatica. In particolare, un maggiore stress idrico per le colture non irrigue che nelle condizioni attuali beneficiano di una falda più superficiale, e una diminuzione dei benefici per gli eventuali fruitori di colature e/o di portate fontanilizie.

5.3 Aspetti fisiologici, ionomici e metabolomici

La diversa gestione dell'acqua di risaia non ha risvolti eclatanti sulla composizione ionica della granella di riso riferita agli elementi di interesse nutrizionale. Al contrario le diverse condizioni di ossigenazione del suolo condizionano sostanzialmente, anche se in maniera opposta, le concentrazioni che Cd e As raggiungono nelle piante e in particolare nella granella. Infatti se la condizione di sommersione limita drasticamente l'accumulo di Cd in granella al contrario accentua quello di As. Un andamento contrario si manifesta quando le piante crescono in condizioni di irrigazione turnata.
E' interessante osservare che se per il Cd la condizione DRY si dimostra del tutto simile alla condizione FLD, nel caso dell'As determina accumuli superiori. L'effetto della semina in asciutta sull'accumulo di As potrebbe essere attribuito ad un maggior sviluppo iniziale dell'apparato radicale, favorito appunto dai primi quaranta giorni di mancata sommersione, che consentirebbe alle piante, nelle fasi successive del ciclo, di esplorare maggiori volumi di suolo.
Alternativamente l'effetto osservato potrebbe riflettere differenze nella dinamica delle fluttuazioni delle concentrazioni di As nella soluzione circolante del suolo che raggiungerebbe nel caso della condizione DRY i picchi di massima in corrispondenza della massima attività di assorbimento e di traslocazione dell'elemento nelle piante.
Occorre comunque sottolineare che, poiché le concentrazioni totali di Cd e As nei suoli dei siti sperimentali considerati sono sostanzialmente basse, le concentrazioni che i due elementi raggiungono nella granella sono minime e comunque al di sotto dei limiti di scurezza per il consumatore. Per il Cd la normativa vigente prevede una concentrazione massima possibile per la commercializzazione di 0,2 mg kg^{-1}. Per l'As, in assenza di una normativa di riferimento, la tendenza attuale è quella di assicurare le concentrazioni più basse possibili. Nel caso delle coltivazioni di riso destinate alla produzione di alimenti per la prima infanzia la precauzione impone valori bassissimi; quindi nel caso di coltivazioni per questa tipologia di produzioni la tecnica della semina interrata e successiva sommersione dei suoli è sconsigliabile.

Nei quattro genotipi osservati l'As totale presente in granella è costituto all' 80% da As inorganico e il resto all'As organico. Le condizioni irrigue, pur agendo i modo differenziato sul livello totale dell'elemento, non modificano assolutamente i rapporti di distribuzione tra le due componenti.
Sia il Cd, sia l'As si accumulano prevalentemente nella pula della cariosside e solo a livelli nettamente inferiori (anche dell'80-90%) nell'endosperma. Quindi un'attenzione particolare deve essere riservata per la presenza dei due elementi per quanto riguarda la commercializzazione e il consumo di riso integrale. Anche le procedure di parabolizzazione potrebbero generare qualche criticità da mantenere sotto controllo in quanto determinano il trasferimento di quantità significative di elementi organici e inorganici, tra cui Cd e As, dai tessuti esterni verso l'edosperma. Anche nel caso di questa tipologia di prodotto, per ridurre al minimo i rischi di accumuli indesiderati di questi elementi in granella è sconsigliabile la condizione DRY nel caso dell'As e la condizione IRR nel caso del Cd.
Le tre diverse gestioni irrigue non si differenziamo in alcun modo per quanto riguarda i livelli di vitamina E e γ-orizanolo nella pula del riso prodotto. Quindi, in particolare per i prodotti destinati al trattamento di parbolizzazione, la tipologia digestione dell'acqua adottata in risaia non può essere sfruttata per produrre prodotti a più elevato contenuto di composti a valenza nutraceutica.
L'approccio metabolomico adottato si è rivelato alquanto efficace per l'identificazione delle eventuali differenze metaboliche indotte dalle tre diverse gestioni irrigue in pula soprattutto per quanto riguarda alcune molecole di interesse industriale come ad esempio l'acido γ-amminobutirrico. In particolare l'accumulo di questa molecola in pula si riduce nel caso della condizione IRR. Esistono i presupposti per un'indagine più approfondita degli effetti di diverse gestioni irrigue sul metabolismo del riso in generale e per la eventuale valorizzazione industriale della pula prodotta come scarto delle lavorazioni del riso integrale.
Infine, l'approccio bioinformatico adottato per analizzare su ampia scala le relazioni esistenti tra i livelli in pula di alcuni elementi minerali e quelli di alcune sostanze con proprietà nutraceutiche (componenti della vitamina E e γ-orizanolo) ha fornito indicazioni che aprono interessanti prospettive applicative. Infatti, qualora confermate su un numero più elevato di cultivar rispetto a quello considerato in questa attività, le correlazioni esistenti permettono l'avvio di una serie di sperimentazioni mirate a verificare se specifici interventi fertilizzanti al suolo siano in grado di modulare positivamente contenuti di composti ad elevato valore nutrizionale nella pula del riso.

5.4 Aspetti molecolari

I risultati conseguiti hanno permesso di identificare nuovi target molecolari per il controllo della regolazione stomatica in riso. La validazione di tali target attraverso l'analisi di espressione in cellule di guardia derivate da diverse accessioni di riso in risposta allo stress e la definizione di polimorfismi correlati all'attività genica consentirà di definire nuovi programmi di breeding mirati al miglioramento dell'efficienza di utilizzo dell'acqua in risicoltura.
L'attività svolta ha consentito inoltre di evidenziare l'esistenza di differenze sostanziali a livello molecolare nei sistemi di regolazione dell'attività stomatica tra il riso e altre specie coltivate quali tabacco, pomodoro e vite. E' ragionevole ritenere che tale divergenza nei network regolativi che modulano l'espressione genica negli stomi riflette la distanza filogenetica ed evolutiva tra mono- e dicotiledoni.
L'analisi diretta dell'espressione genica in cellule di guardia microdissezionate da foglie ha consentito l'identificazione di nuovi regolatori dell'attività stomatica in riso. Tali risultati rappresentano la base per lo sviluppo di programmi di breeding volti al controllo delle risposte stomatiche in riso al fine di ottenere varietà con una maggior efficienza d'uso dell'acqua ed un miglior adattamento alla coltivazione in anaerobiosi.

Lo sviluppo di metodologie alternative di risicoltura, caratterizzate da un ridotto utilizzo di acqua, deve tenere conto della maggiore esposizione delle piante al rischio di stress idrici e termici, specialmente durante la fioritura e l'allegagione, e quindi richiede l'utilizzo di varietà adatte. La caratterizzazione di fattori genetici in grado di aumentare la tolleranza alle alte temperature, permetterà una più rapida verifica delle varietà italiane, in parallelo alle prove in campo e in serra, e permetterà anche di sviluppare opportuni marcatori e protocolli per lo sviluppo di programmi di selezione assistita.
Rispetto al problema della sensibilità degli organi fiorali di riso alle alte temperature che potrebbe acuirsi nel caso dell'azione della irrigazione turnata, i risultati ottenuti hanno fornito indicazioni utili a chiarire il ruolo di alcuni meccanismi che intervengono a protezione dello sviluppo del tubulo pollinico in condizioni di alta temperatura.
Sebbene la tolleranza a questo tipo di stress termico sia un carattere complesso, alcuni QTL (ad esempio quello localizzato sul quarto cromosoma) sono già stati identificati. Il maggior dettaglio molecolare definito dalla attività di ricerca nell'ambito di questo progetto apre presupposti promettenti per la costituzione di nuovi marcatori molecolari da applicare con maggior precisione in strategie di miglioramento genetico e di breeding per varietà di riso maggiormente tolleranti le alte temperature in fase di fioritura e fecondazione.
N22 è una razza locale di riso sviluppata in India, ed è uno dei risi più tolleranti alle alte temperature e alla carenza idrica che si conoscano. Sebbene, in termini di resa e di statura, la pianta non sia adatta alla nostra realtà produttiva, N22 è invece di estremo interesse per l'introgressione genetica di nuovi caratteri di resistenza nel germoplasma del riso italiano.

5.5 Aspetti microbiologici

Tramite tecniche di indagine dipendenti dalla coltivazione è stato analizzato il microbioma associato a piante di riso della varietà Baldo. Dal momento che lo scopo ultimo della ricerca è la selezione di inoculi batterici in grado di migliorare le performance produttive delle specie vegetali in condizioni di stress, lo studio si è concentrato sulle nicchie ecologiche aventi un elevato grado di associazione con la pianta, quali i tessuti radicali ed il suolo rizosferico, investigando il loro ruolo nei i processi di protezione e promozione della crescita vegetale durante carenze idriche. I risultati ottenuti *in vitro* mostrano come le attività PGP più diffuse costituiscono alcuni dei meccanismi ritenuti fondamentali per la promozione della crescita vegetale. La produzione di acido indolacetico, un fitormone appartenente al gruppo delle auxine, influenza direttamente il bilancio ormonale della pianta, stimolando in particolare lo sviluppo dell'apparato radicale. La solubilizzazione del fosfato garantisce la presenza di fosforo biodisponibile, che costituisce uno dei fattori limitanti lo sviluppo della pianta. Questi dati confermano l'idea che i batteri naturalmente associati a piante di riso sottoposte a stress idrico con attività PGP rappresentino un potenziale biofertilizzante da utilizzabile in campo per proteggere le piante. Al tempo stesso grazie all'azione di promozione della crescita vegetale, l'utilizzo di questi inoculi batterici può contribuire all'incremento della produttività risicola.
Future ricerche dovranno approfondire le conoscenze sulla diversità metabolica e genetica dei ceppi che hanno dimostrato *in vitro* attività PGP, per una futura applicazione in campo di formulati batterici con attività biofertilizzante. In particolare una successiva fase di analisi *in vivo* ed in campo dell'attività PGP dei ceppi che hanno dimostrato le migliori caratteristiche di promozione *in vitro*, permetterà di valutare se l'utilizzo di microrganismi PGP può costituire uno strumento efficace nel favorire l'adattamento di cultivar di riso tradizionalmente coltivate in condizioni di sommersione continua a tecniche di gestione irrigua che consentano una riduzione dei volumi di acqua impegnati.

5.6 Aspetti economici

L'adozione di tecniche irrigue alternative sembra consentire il raggiungimento di un maggior risparmio idrico senza sacrificare una quota consistente della produzione; per gli agricoltori, di conseguenza, essere rappresentano metodologie gestionali che non modificano in termini sostanziali i redditi aziendali complessivi.

L'adozione di una tariffa volumetrica condurrebbe alla diminuzione dei margini per le aziende che ancora praticano una risicoltura tradizionale e rappresenta perciò un valido incentivo per diversificare le tecniche irrigue privilegiando il *water-saving*.

Il modello di ottimizzazione delle scelte gestionali individuato può essere applicato a diversi comprensori o realtà territoriali e può essere integrato con ulteriori fattori esterni o interni al sistema per valutare situazioni più complesse.

In particolare, si segnala che quanto messo a punto è un'analisi di base che non comprende gli aspetti più prettamente ambientali. Se da una parte l'adozione di una tariffa volumetrica consentirebbe sia di soddisfare le indicazioni fornite dalla Direttiva Quadro sulle acque 2000/60, sia di incentivare un calo dei consumi idrici, strategia quest'ultima che può servire per affrontare situazioni di carenza idrica o minore disponibilità della stessa, occorre però anche considerare che un minore consumo idrico avrebbe nel medio-lungo periodo ripercussioni sull'intero sistema risicolo. Una maggiore diffusione della coltivazione in asciutta (riso aerobico) o di irrigazioni periodiche, infatti, modificherebbero il complesso sistema ambientale ed ecologico delle risaie e la diminuita disponibilità idrica potrebbe incidere sul ciclo idrologico a scala locale, interferendo e modificando il ritorno dell'acqua alle aziende, ai corpi idrici superficiali ed alle falde acquifere, oltre che determinare una differente gestione degli ordinamenti colturali a favore di colture meno idro-esigenti.

Le indicazioni ottenute dalla metodologia applicata devono quindi confrontarsi con i più ampi effetti di carattere ambientale e non possono costituire né per l'agricoltore né per il policy maker delle risposte esaustive. Esse possono trovare riscontro reale solo considerando il più vasto sistema nel quale il territorio analizzato si colloca, anche in termini di posizionamento sul mercato locale e globale delle relative produzioni. A tale scopo uno sviluppo metodologico può riguardare la valutazione i costi ambientali derivanti dall'adozione di una o l'altra tipologia gestionale a fianco della valutazione del conseguente livello di competitività per il sistema delle imprese.

6. Bibliografia

Allavena L. (1995) Coefficienti colturali per la stima della evapotraspirazione del riso nell'ambiente climatico della pianura padana nord-occidentale. *Irrigazione e drenaggio*, XLII: 28-35.

ARPA Lombardia (2013) http://www2.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo/richiesta-dati-misurati/Pagine/RichiestaDatiMisurati.aspx (Download: Ottobre 2013).

Babu R.C., Nguyen B.D., Chamarerk V., Shanmugasundaram P., Chezhian P., Jeyaprakash P., Ganesh S.K., Palchamy A., Sadasivam S., Sarkarung S., Wade L.J., Nguyen H.T. (2003) Genetic analysis of drought resistance in rice by molecular markers: Association between secondary traits and field performance. *Crop Science,* 43: 1457-1469.

Bailey-Serres J., Fukao F., Ronald P., Ismail A., Heuer S., Mackill D. (2010) Submergence tolerant rice: SUB1's journey from landrace to modern cultivar. *Rice,* 3: 138–147.

Baroni G., Facchi A., Gandolfi C., Ortuani B., Horeschi D., van Dam J.C. (2010) Uncertainty in the determination of soil hydraulic parameters and its influence on the performance of two hydrological models of different complexity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14: 251-270.

Bernier J., Kumar A., Ramaiah V., Spaner D., Atlin G.N. (2007) Large-Effect QTL for Grain Yield under Reproductive-Stage Drought Stress in Upland Rice. *Crop Science,* 47: 507- 516.

Borrell A., Garside A., Fukai S. (1997) Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 52: 231-248.

Bouman, B.A.M., Humphreys E., Tuong, T.P., Barker R. (2007a) Rice and Water. *Advances in Agronomy*, 92: 187-237.

Bouman B.A.M., Lampayan R.M., Tuong T.P., (2007b) *Water management in irrigated rice; coping with water scarcity*. Los Baños (Philippines): International Rice Research Insitute. 54 p. ISBN 978-971-22-0219-3.

Bouman B.A.M., Peng S., Castañeda A.R., Visperas R.M. (2005) Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agricultural Water Management*, 74: 87-105.

Bouman B.A.M., Tuong T.P. (2001) Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management:* 49, 11-30.

Bramley P.M., Elmadfa I., Kafatos A., Kelly F.J., Manios Y., Roxborough H.E., Schuch W., Sheehy P.J.A., Wagner K.H. (2000) Vitamin E. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 913-938.

Bric J. M., Bostock R. M., Silverstone S. E. (1991). Rapid in situ assay for indole acetic acid production by bacteria immobilized on a nitrocellulose membrane. *Applied and Environmental Microbiology*, 57(2): 535-538.

Britz S.J., Prasad P.V.V., Moreau R.A., Allen L.H.J., Kremer D.F., Boote K.J. (2007) Influence of growth temperature on the amounts of tocopherols, tocotrienols, and c-oryzanol in brown rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 55: 7559-7565.

Cabangon R.J., Tuong T.P., Castillo E.G., Bao L.X., Lu G., Wang G.H., Cui L., Bouman B.A.M., Li Y., Chen C., Wang J. (2004) Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy and Water Environment*, 2: 195–206.

Castellani, L., Mancuso T., Missaglia S. (2008) Aspetti normativi ed economici in materia di gestione e tutela delle risorse ad uso irriguo in Piemonte. In: *Acqua, agricoltura e ambiente nei nuovi scenari di politica comunitaria*, Casini, l. Gallerani, V. Viaggi D. (a cura di), Franco angeli Editori, Milano. ISBN 978-88-568-0488-1, pp. 31.

Cattani I., Romani M., Boccelli R. (2008) Effect of cultivation practices on cadmium concentration in rice grain. *Agronomy for Sustainable Development*, 28: 265-271.

Cavalluzzo D., Albertario E., Perrini. R, Valè G. (2012) Riso: evoluzione della ricerca scientifica e del miglioramento genetico dall'inizio del secolo scorso. In: *Il concorso sementi di riso un secolo di selezione e miglioramento varietale*, pp. 7-27.

Chen M.H., Bergman C.J., (2005) A rapid procedure for analyzing rice bran tocopherol, tocotrienol and γ-oryzanol contents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 18: 139-151.

Chen Y., Wang M., Ouwerkerk P.B.F. (2012) Molecular and environmental factors determining grain quality in rice. *Food and Energy Security,* 1: 111-132.

Cheng W., Zhang G., Zhao G., Yao H., Xu H. (2003) Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management. *Field Crops Research*, 80: 245-252.

Chiaradia E.A., Ferrari D., Bischetti G.B. , Facchi A., Gharsallah O., Romani M., Gandolfi C. (2013) Monitoring water fluxes in rice plots under three different cultivation methods. Abstract in the proceedings of the 10th Conference of the Italian Society of Agricultural Engineering: Horizons in agricultural, forestry and biosystems engineering. Viterbo (Italy): September 8-12, 2013. *Journal of Agricultural Engineering 2013*, vol. XLIV(s2).

Choudhury B.U., Bouman B.A.M., Singh A.K. (2007) Yield and water productivity of rice-wheat on raised beds at New Delhi, India. *Field Crops Research*, 100: 229-239.

CODEX STAN 193–1995 (2009) Codex general standard for contaminants and toxins in foods and feed [WWW document].URL http://www.codexalimentarius.net/download/standards/17/ CXS_193e.pdf.

Colmer T.D., Pedersen O. (2008) Oxygen dynamics in submerged rice (*Oryza sativa*). *New Phytologist*, 178(2): 326-334.

Cominelli E., Conti L., Tonelli C., Galbiati M. (2013) Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. *New Biotechnology*, 30: 355-361.

Cominelli E., Galbiati M., Albertini A., Fornara F., Conti L., Coupland G., Tonelli C. (2011) DOF-binding sites additively contribute to guard cell-specificity of AtMYB60 promoter. *BMC Plant Biology*, 11: 142.

Cominelli E., Galbiati M., Vavasseur A., Conti L., Sala T., Vuylsteke M., Leonhardt N., Dellaporta S.L., Tonelli C. (2005) A guard cell-specific MYB transcription factor regulates stomatal movements and plant drought tolerance. *Current Biology*, 15: 1196-1200.

Cottyn B., Regalado E., Lanoot B., De Cleene M., et al. (2001) Bacterial populations associated with the rice seed in the tropical environment. *Phytopathology,* 91: 282-292.

De Datta S.K. (1981) *Principles and practices of rice production.* New York, J. Wiley & Sons. 618 pp.

Dong B., Molden D., Loeve R., Li Y.H., Chen C.D., Wang J.Z. (2004) Farm level practices and water productivity in Zanghe Irrigation System. *Paddy and Water Environment*, 2:217-226.

Dunn B.W., Gaydon D.S. (2011) Rice growth, yield and water productivity responses to irrigation scheduling prior to the delayed application of continuous flooding in south-east Australia. *Agricultural Water Management*, 98: 1799-1807.

ENR (2013) XLVI Relazione Annuale Anno 2013*.* Ente Nazionale Risi*. Il Risicoltore*.

ERSAL (1993) *I suoli della Lomellina Settentrionale. Progetto "Carta Pedologica".* Regione Lombardia, Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia.

Facchi A., Gharsallah O., Chiaradia E.A., Bischetti G.B., Gandolfi C. (2013a) Monitoring and modelling evapotranspiration in flooded and aerobic rice fields. In: *Four Decades of Progress in Monitoring and Modeling of Processes in the Soil-Plant-Atmosphere System: Applications and Challenges*. Procedia Environmental Sciences*,* 19: 794-803.

Facchi A., Gharsallah O., Gandolfi C. (2013b) Evapotranspiration models for a maize agro-ecosystem in irrigated and rainfed conditions. Abstract in the proceedings of the 10th Conference of the Italian Society of Agricultural Engineering: Horizons in agricultural, forestry and biosystems engineering. Viterbo (Italy): September 8-12, 2013. *Journal of Agricultural Engineering 2013*, vol. XLIV(s2).

FAO (2012) Food and Agriculture Organization. FAOSTAT on-line electronic database. http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/Q/QC/E (Download: Ottobre 2013).

Fofana M., Cherif M., Kone B., Futakuchi K., Audebert A. (2010) Effect of water deficit at grain repining stage on rice grain quality. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 2: 100-107.

Fukai S., Cooper M. (1995) Development of drought-resistant cultivars using physio-morphological traits in rice. *Field Crops Research*, 40: 67-86.

Galbiati M., Matu J.T., Francia P., Rusconi F., Cañón P., Medina C., Conti L., Cominelli E., Tonelli C., Arce-Johnson P. (2011) The grapevine guard cell-related VvMYB60 transcription factor is involved in the regulation of stomatal activity and is differentially expressed in response to ABA and osmotic stress. *BMC Plant Biology*, 11: 162.

Galbiati M., Simoni L., Pavesi G., Cominelli E., Francia P., Vavasseur A., Bevan M., Nelson T., Tonelli C. (2008) Gene trap lines identify Arabidopsis genes expressed in stomatal guard cells. *The Plant Journal,* 53: 750-762.

Gamuyao R., Chin J.H., Pariasca-Tanaka J., Pesaresi P., Catausan S., Dalid C., Slamet-Loedin I., Tecson-Mendoza E.M., Wissuwa M., Heuer S. (2012) The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. *Nature,* 488: 535-539.

Gandolfi C., Agostani D., Facchi A., Ortuani B., Rienzner M. (2010) *Modello e codice di calcolo IdrAgra* (IdrAgra model and computer code). Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano.

Gharsallah O., Facchi A., Gandolfi C. (2013) Comparison of six evapotranspiration models for a surface irrigated maize agro-ecosystem in Northern Italy. *Agricultural Water Management*, 130: 119-130.

Giardini L. (2000) *Coltivazioni erbacee* . Patron Editore, Bologna.

Govindarajan S., Ambujam N.K., Karunakaran K. (2008) Estimation of paddy water productivity (WP) using hydrological model: an experimental study. *Paddy and Water Environment*, 6: 327–339.

Greppi D., Vallino M., Lanzanova C., Cavigiolo S., Lupotto E. (2007) Risicoltura e risparmio idrico: adattabilità della coltura. *Dal Seme* 1: 51-54.

Gurley W.B. (2000) HSP101: a key component for the acquisition of thermotolerance in plants. *The Plant Cell,* 12: 457-460.

Heinemann R.J.B., Xu Z., Godber J.S., Lanfer-Marquez U.M. (2008) Tocopherols, tocotrienols, and c-oryzanol contents in japonica and indica subspecies of rice (Oryza sativa L.) cultivated in Brazil. *Cereal Chemistry,* 85: 243-247.

Hijmans R.J., Guiking-Lens I.M., van Diepen C.A. (1994) *User's guide for the WOFOST 6.0 crop growth simulation model*. Technical Document 12, Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 144 p.

Hiller K., Hangebrauk J., Jager C., Spura J., Schreiber K., Schomburg D., (2009) Metabolite Detector: comprehensive analysis tool for targeted and non-targeted GC/MS based metabolome analysis. *Analytical Chemistry*, 81: 3429-3439.

Hou A.X., Chen G.X., Wang Z.P., Van Cleemput O., Patrick W.H.Jr. (2000) Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes*. Soil Science Society of America Journal*, 64: 2180-2186.

Igbadun, H., Mahoo H., Tarimo A., Salim B. (2006) P*erformance of two temp-based refernce evapotranspiration models in the Mkoji subcatchment in Tanzania*. Agric. Eng. Int.: the GRIGE J. Manuscript LW 05 008. Vol. VIII.

IRRI (2002) *Standard evaluation system of rice (SES)*. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.

IRSA-CRN and APAT- Manuali e linee guida. (1994) *Metodi analitici per le acque*. Volume 2, Sezione 4000, Costituenti inorganici non metallici. APAT, Roma.

Jagadish S.V.K., Craufurd P.Q., Wheeler T.R. (2008) Phenotyping Parents of Mapping Populations of Rice for Heat Tolerance during Anthesis. *Crop Science*, 48: 1140-1146.

Jagadish S.V.K., Muthurajan R., Oane R., Wheeler T.R., Heuer S., Bennett J., Craufurd P.Q. (2010) Physiological and proteomic approaches to address heat tolerance during anthesis in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany,* 61: 143-156.

Kassam A., Smith M. (2001) *FAO methodologies in crop water use and crop water productivity*. Expert meeting on water productivity, FAO, Roma 3-5 Dicembre 2001.

Köppen W., Geiger R. (1936) Das Geographische System der Klimate. In: Köppen W., Geiger R. (Eds). *Handbuch der Klimatologie*, Vol.1. Verlag Gebrüder Bornträger, Berlin , p.1-44.

Kroes J.G., van Dam J.C. (2003) *Reference Manual SWAP version 3.0.3*. Alterra-report 773. Wageningen, Alterra, Green World Research; ISSN 1566-7197.

Lisec J., Schauer N., Kopka J., Willmitzer L., Fernie A.R. (2006) Gas chromatography mass spectrometry based metabolite profiling in plants. *Nature Protocols,* 1: 387–396.

Lombi E., Scheckel K.G., Pallon J., Carey A.M., Zhu Y.G., Meharg A.A. (2009) Speciation and distribution of arsenic and localization of nutrients in rice grains. *New Phytologist*, 184: 193-201.

Lupi D., Colombo M. (2005) Osservazioni e monitoraggio sul punteruolo acquatico del riso*. L'informatore agrario*, 31: 69-71.

Mano H., Tanaka F., Nakamura C., Koga H., Morisaki H. (2007). Culturable endophytic bacterial flora of the maturing leaves and roots of rice plants (*Oryza sativa*) cultivated in a paddy field. *Microbes and Environments,* 22: 175-185.

Marasco R., Rolli E., Ettoumi B., Vigani G., Mapelli F., Borin S., et al. (2012) A drought resistance-promoting microbiome is selected by root system under desert farming. *PLoS ONE,* 7: e48479.

Mehta S., Nautiyal C.S. (2001) An efficient method for qualitative screening of phosphate-solubilizing bacteria. *Current Microbiology*, 43(1): 51–56.

Molden D. (1997). *Accounting for water use and productivity*. International Irrigation Management Institute – System Wide Initiative for Water Management (SWIM) paper 1.

Moletti M. (1989) La coltivazione del riso senza sommersione in Italia. *L'informatore agrario*, 2: 59-68.

Mualem Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12: 513-522.

Oka H.I. (1988) *Origin of cultivated rice.* Japan Sci. Soc. Press/Elsevier, Tokyo/Amsterdam.

Ortega-Farias S., Poblete-Echeverría C., Brisson N. (2010) Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2): 276-286.

Padgham J.L., Sikora R.A., (2007) Biological control potential and modes of action of *Bacillus megaterium* against *Meloidogyne graminicola* on rice. *Crop Protection,* 26: 971-977.

Palanisami K., Suresh Kumar D. (Eds.) (2006) *Challenges in impact assessment of watershed development: methodological issues and experiences*, Associated Publishing Company Ltd., New Delhi.

Penrose D.M., Glick B.R. (2003). Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth- promoting rhizobacteria. *Physiologia Plantarum*, 118(1): 10–15.

Reddy Ch.S., Babu A.P., Swamy B.P., Kaladhar K., Sarla N. (2009) ISSR markers based on GA and AG repeats reveal genetic relationship among rice varieties tolerant to drought, flood, or salinity. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B,* 10: 133-141.

Rodriguez R.J., Henson J., Van Volkenburgh E., Hoy M., Wright L., et al. (2008) Stress Tolerance in Plants via Habitat-Adapted Symbiosis. *International Society for Microbial Ecology,* 2: 404-416.

Romani M. (2003) Impiego in risaia sommersa di concimi a lenta trasformazione. *L'informatore agrario*, 19: 31-37.

Rusconi F., Simeoni F., Francia P., Cominelli E., Conti L., Riboni M., Simoni L., Martin C.R., Tonelli C., Galbiati M. (2013) The AtMYB60 promoter provides a tool for the spatio-temporal control of gene expression in stomatal guard cells. *Journal of Experimental Botany*, 64 (11): 3361-3371.

Santaella C., Schue M., Berge O., Heulin T., Achouak W. (2008) The exopolysaccharide of Rhizobium sp. YAS34 is not necessary for biofilm formation on Arabidopsis thaliana and *Brassica napus* roots but contributes to root colonization. *Environmental Microbiology*, 10(8): 2150-2163.

Schaap M.G., Leij F.J., van Genuchten M.Th. (2001) ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251(3–4): 163–176.

Schachtman D.P., Goodger J.Q. (2008) Chemical root to shoot signaling under drought. *Trends in Plant Science,* 13: 281-287.

Schwyn B., Neilands J. B. (1987) Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical Biochemistry*, 160(1): 47-56.

Sharma P.K., Bhushan Lav, Ladha J.K., Naresh R.K., Gupta R.K., Balasubramanian B.V., Bouman B.A.M. (2002) Crop-water relations in rice-wheat cropping under different tillage systems and water-management practices in a marginally sodic, medium-textured soil. In: Bouman B.A.M., Hengsdijk H., Hardy B., Bindraban P.S., Tuong T.P. Ladha J.K., editors. *Water-wise rice production*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines. p 223-235.

Sheppard A.J., Pennington J.A.T., Weihrauch J.L. (1993) Analysis and distribution of vitamin E in vegetable oils and foods. In: Packer L., Fuchs J. (eds). *Vitamin E in health and disease*. Marcel Dekker, New York, pp 9-31.

Shin T.S., Godber J.S., Martin D.E., Wells J.H. (1997) Hydrolytic stability and changes in E vitamers and oryzanol of extruded rice bran during storage. *Journal of Food Science*, 62: 704-728.

SIARL (2011) Sistema informativo Agricolo della Regione Lombardia. https://www.siarl.regione.lombardia.it

Siddikee M. A., Chauhan P. S., Anandham R., Han G., Sa T. (2010) Isolation, characterization, and use for plant growth promotion under salt stress, of ACC deaminase producing halotolerant bacteria derived from coastal soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20: 1577-1584.

Spitters C.J.T., van Keulen H., van Kraalingen D.W.G. (1989) A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: Rabbinge R, Ward SA, van Laar HH (Eds.). *Simulation and systems management in crop protection*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. p. 147-181.

Sritharan N., Vijayalakshmi C. (2007) Relative water content, chlorophyll stability index, proline, epicuticular wax content and yield attributes of rice genotypes under aerobic condition. *Plant Archives,* 7: 301-304.

Sritharan N., Vijayalakshmi C. (2007) RUBISCO, nitrate reductase and IAA oxidase activity of rice genotypes through aerobic cultivation. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences,* 3: 844-847.

Stockle C.O., Nelson R.L., (1996) *Cropsyst User's manual* (Version 2.0), Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman, WA, USA.

Sun L., Qiu F., Zhang X., Dai X., et al. (2008) Endophytic bacterial diversity in rice (*Oryza sativa* L.) roots estimated by 16S rDNA sequence analysis. *Microbial Ecology*, 55: 415-424.

Teixeira A.H. de C., Bastiaanseen W.G.M., Moura M.S.B., Soares J.M., Ahmad M.D., Bos M.G. (2008) Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 1524-1537.

Tuong, T.P., Bouman, B.A.M., Mortimer M. (2005) More rice, less water – integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. *Plant Production Science*, 8: 231-241.

USDA (1975) *Soil Taxonomy, First Edition*. Soil Survey Staff, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

USDA (2010) *Soil Taxonomy, Eleventh Edition*. Soil Survey Staff, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.

Vallino M., Greppi D., Novero M., Bonfante P., Lupotto E. (2009) Rice root colonisation by mycorrhizal and endophytic fungi in aerobic soil. *Annals Of Applied Biology*, 154(2): 195-204.

Van Genuchten M.Th. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsatured soils. *Soil Science Society of America Journal,* 44: 892-898.

Vazifedoust M., van Dam J.C., Feddes R.A., Feizi M. (2008) Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. *Agricultural Water Management*, 95: 89-102.

Vrugt, J.A., Gupta H.V., Bouten W., Sorooshian S. (2003) A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 39: 1201.

Yan X., Yagi K., Akiyama H., Akimoto H. (2005) Statistical analysis of major variables controlling methane emission from rice fields. *Global Change Biology*, 11: 1131-1141.

Yang J., Kloepper J.W., Ryu C.M. (2009) Rhizosphere bacteria help plants tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 14: 1-4.

Ye C., Argayoso M.A., Redoña E.D., Sierra S.N., Laza M.A., Dilla C.J., Mo Y., Thomson M.J., Chin J., Delaviña C.B., Diaz G.Q., Hernandez J.E. (2012) Mapping QTL for heat tolerance at flowering stage in rice using SNP markers. *Plant Breeding* 131: 33-41.

Yu K., Patrick W.H. Jr. (2004) Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 2086-2091.

Zahir Z.A., Iqbal M., Arshad M., Naveed M., Khalid M. (2007) Effectiveness of IAA, GA3 and kinetin blended with recycled organic waste for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pakistan Journal of Botany,* 39: 761-768.

Zavala Y.J., Gerads R., Gürleyük H., Duxbury J.M. (2008) Arsenic in Rice: II. Arsenic speciation in USA Grain and Implications for Human Health. *Environmental Science & Technology, 42:* 3861-3866*.*

Zhang G.Y., Liu R.R., Xu G., Zhang P., Li Y., Tang K.X., Liang G.H., Liu Q.Q. (2013) Increased α-tocotrienol content in seeds of transgenic rice overexpressing Arabidopsis γ-tocopherol metyltranferase. *Transgenic Research*, 22(1): 89-99.

Zhang G.Y., Liu R.R., Zhang P., Xu Y., Zhu J., Gu M.H., Liang G.H., Liu Q.Q. (2012) Variation and distribution of vitamin E and composition in the seeds among different rice varieties. *Acta Agronomica Sinica*, 38: 55-61.

Zhang Z., Zhang J., Yang J., Zhang J. (2008) Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation. *Field Crops Research,* 108: 71-81.

Zhao F.J., Zhu Y.G., Meharg A.A. (2013) Methylated Arsenic Species in Rice: Geographical Variation, Origin, and Uptake Mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 47: 3957-3966.

Zigoneanu I.G., Williams L., Xu Z., Sabliov C.M. (2008) Determination of antioxidant components in rice bran oil extracted by microwave-assisted method. *Bioresource Technology*, 99: 4910-4918.

RegioneLombardia

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO BICOCCA

CRA CONSIGLIO PER LA RICERCA E LA SPERIMENTAZIONE IN AGRICOLTURA

Parco Tecnologico Padano La ricerca si fa impresa

FONDAZIONE FILARETE

AGRICOLA 2000 COOP. - PERAZIONI

Camera di Commercio Lodi

ENTE NAZIONALE RISI MILANO

http://www.biogesteca.unimi.it/

RegioneLombardia