



With the contribution of LIFE  
Programme 2014-2020 of the EU  
**LIFE AGROWETLANDS II**  
**LIFE15 ENV/IT/000423**



## **LIFE AGROWETLANDS II**

**Smart Water and Soil Salinity Management  
in Agro-wetlands**

**LIFE15 ENV/IT/000423**

# **Rapporto Tecnico Finale del Progetto Project Final Technical Report**

**Deliverable 3 of Action E.1**



## DATI DI PROGETTO

### Coordinatore

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna,  
Dipartimenti DISTAL e DICAM - [www.unibo.it](http://www.unibo.it);  
project leader: Maria Speranza  
[maria.speranza@unibo.it](mailto:maria.speranza@unibo.it)

### Partner

Agrisfera Società Cooperativa Agricola p.a.,  
S. Alberto (Ravenna)  
[www.agrisfera.it](http://www.agrisfera.it) - [paolo.pietrobon@agrisfera.it](mailto:paolo.pietrobon@agrisfera.it)  
OSV srl, Villa Poma (Mantova)  
[www.osv.it](http://www.osv.it) - [f.barbi@osv.it](mailto:f.barbi@osv.it)  
WINET srl, Cesena (Forlì-Cesena)  
[www.winetsrl.com](http://www.winetsrl.com) - [etavelli@winetsrl.it](mailto:etavelli@winetsrl.it)

### Finanziamento

LIFE Programme 2014-2020 Environment and  
Resource Efficiency - Call 2015 (LIFE15 ENV/  
IT/000423)

### Budget di progetto

939.431 € (finanziamento EU 559.591 €)

### Durata

45 mesi (da 1 settembre 2016 a 30 giugno 2020)

### Area di realizzazione

Emilia-Romagna (Ravenna) - Italia  
Comunidad Valenciana (Elche - Comunidad  
de Regantes de Carrizales) - Spagna

---

A cura di Alberto Lamberti

#### Autori

Capitolo 1: M. Speranza  
Capitolo 2: C. Lambertini, S.S. Cipolla, M. Masina,  
L. Vittori Antisari, A. Lambertini, M. Speranza  
Capitolo 3: A. Lamberti, M. Masina, M. Speranza  
Capitolo 4: A. Lamberti, M. Masina, S.S. Cipolla,  
R. Calone, A. Lambertini  
Capitolo 5: J.M. de Paz, R. Calone  
Capitolo 6: A. Lamberti, M. Speranza

## PROJECT DATA

### Coordinating Beneficiary

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna,  
Dipartimenti DISTAL e DICAM - [www.unibo.it](http://www.unibo.it);  
project leader: Maria Speranza  
[maria.speranza@unibo.it](mailto:maria.speranza@unibo.it)

### Partner

Agrisfera Società Cooperativa Agricola p.a.,  
S. Alberto (Ravenna)  
[www.agrisfera.it](http://www.agrisfera.it) - [paolo.pietrobon@agrisfera.it](mailto:paolo.pietrobon@agrisfera.it)  
OSV srl, Villa Poma (Mantova)  
[www.osv.it](http://www.osv.it) - [f.barbi@osv.it](mailto:f.barbi@osv.it)  
WINET srl, Cesena (Forlì-Cesena)  
[www.winetsrl.com](http://www.winetsrl.com) - [etavelli@winetsrl.it](mailto:etavelli@winetsrl.it)

### Funding

LIFE Programme 2014-2020 Environment and  
Resource Efficiency - Call 2015 (LIFE15 ENV/  
IT/000423)

### Project budget

939.431 € (finanziamento EU 559.591 €)

### Project duration

45 mesi (da 1 settembre 2016 a 30 giugno 2020)

### Project area

Emilia-Romagna (Ravenna) - Italy  
Comunidad Valenciana (Elche - Comunidad  
de Regantes de Carrizales) - Spain

---

Edited by Alberto Lamberti

#### Authors

Chapter 1: M. Speranza  
Chapter 2: C. Lambertini, S.S. Cipolla, M. Masina,  
L. Vittori Antisari, A. Lambertini, M. Speranza  
Chapter 3: A. Lamberti, M. Masina, M. Speranza  
Chapter 4: A. Lamberti, M. Masina, S.S. Cipolla,  
R. Calone, A. Lambertini  
Chapter 5: J.M. de Paz, R. Calone  
Chapter 6: A. Lamberti, M. Speranza



**AGROWETLANDS II**



# INDICE

<b>1. SCOPO E STRUTTURA GENERALE DEL PROGETTO</b>	<b>6</b>
<b>2. CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE DELL'AREA DI PROGETTO</b>	
2.1 - IDENTIFICAZIONE DELL'AREA DI PROGETTO	10
2.2 - CONDIZIONI CLIMATICHE	12
2.3 - GEOMORFOLOGIA DELL'AREA	14
2.4 - IDROLOGIA SUPERFICIALE E SALINITÀ	16
2.5 - FALDA FREATICA E SALINITÀ	22
2.6 - SUOLI: TIPI, DELINEAZIONE E SALINITÀ	27
2.7 - USO DEL SUOLO: ZONE AGRICOLE, AREE SEMINATURALI, NATURALI E PROTETTE	32
2.8 - IL DATABASE AMBIENTALE DI LIFE AGROWETLANDS II	40
2.9 - LA RETE WIRELESS DI SENSORI	44
<b>3. IL SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI DI LIFE AGROWETLANDS II</b>	
3.1 - SISTEMI A CONFRONTO PER LA FORMULAZIONE DI CONSIGLI IRRIGUI IN AMBITO MEDITERRANEO	49
3.2 - AQUACROP: IL MODELLO DI RIFERIMENTO PER IL DSS SMART AGROWETLANDS	52
3.3 - I PARAMETRI RICHIESTI DA AQUACROP	58
3.4 - LA CALIBRAZIONE DI AQUACROP SU MAIS	65
3.5 - STAGIONE CULTURALE 2018: FORMULAZIONE DEL CONSIGLIO IRRIGUO IN OPEN-LOOP	77
3.6 - STAGIONE CULTURALE 2019: FORMULAZIONE DEL CONSIGLIO IRRIGUO IN CLOSED-LOOP	85
3.7 - IL PORTALE PER IL CONTATTO CON GLI AGRICOLTORI	92
<b>4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SMART AGROWETLANDS</b>	
4.1 - CONDIZIONI IDROLOGICHE DEL PERIODO DI MONITORAGGIO	100
4.2 - EFFETTI DELL'IRRIGAZIONE SUI LIVELLI E LA SALINITÀ DELLE ACQUE DI FALDA	102
4.3 - REGIME DELLE PORTATE E DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE NEI CANALI DI BONIFICA	108
4.4 - EFFETTI SULLE COLTURE	113
4.5 - UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI IN AGRICOLTURA	118
4.6 - ELABORAZIONE DI INDICI DEDICATI E DEDUZIONI	120
4.7 - INFORMAZIONI UTILI ALLA AGRICOLTURA DESUNTE DALLE IMMAGINI SATELLITARI	125
4.8 - UTILIZZO DI IMMAGINI DA DRONE AD ELEVATA RISOLUZIONE	136



<b>5. APPLICAZIONE DI SMART AGROWETLANDS NELLA SPAGNA MEDITERRANEA</b>	
5.1 - CARATTERISTICHE DELL'AREA DEI CARRIZALES DI ELCHE	146
5.2 - RETE WSN INSTALLATA	147
5.3 - COLTIVAZIONE E GESTIONE DEL CAMPO DIMOSTRATIVO	148
5.4 - ANALISI DELLE RACCOMANDAZIONI IRRIGUE	151
<b>6. CONCLUSIONI</b>	
6.1 - LA RETE	154
6.2 - IL PORTALE	154
6.3 - IL MODELLO E DSS	155
6.4 - PROSPETTIVE	156
6.5 - CONCLUSIONI	157
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b>	158

# 1. SCOPO E STRUTTURA GENERALE DEL PROGETTO

Il progetto LIFE AGROWETLANDS II – *Smart water and soil salinity management in agro-wetlands* – LIFE15 ENV/IT/000423, è stato cofinanziato con quasi 600.000 euro nell'ambito del Programma LIFE 2014-2020, sottoprogramma Ambiente e Uso Efficiente delle Risorse, ed è stato attivo dal settembre 2016 al giugno 2020.

Il progetto ha approfondito aspetti che riguardano l'utilizzo di tecnologie innovative applicate in ambito agricolo, adatte ad essere replicate, trasferite o integrate, come richiesto dalle politiche e dalla legislazione europea in materia di efficienza nell'uso delle risorse ambientali.

Con l'obiettivo di ottimizzare il quantitativo di acqua utilizzata per l'irrigazione, mantenendo la produzione e conservando al meglio la funzionalità del suolo, LIFE AGROWETLANDS II ha sviluppato un Decision Support System, denominato *Smart Agrowetlands*, dedicato alla gestione dell'irrigazione in aree soggette a fenomeni di salinizzazione delle acque e del suolo.

Il progetto ha operato in un'area prossima alla costa adriatica in provincia di Ravenna, presso l'azienda agricola Agrisfera, partner del progetto stesso. L'area è caratterizzata da processi d'intrusione di acqua marina nell'acquifero superficiale e lungo il tratto terminale dei corsi d'acqua, a causa della subsidenza (fino a 1.5 mm/anno), generata da molteplici cause, e del generale innalzamento del livello del mare. La presenza di una falda salata piuttosto superficiale determina fenomeni di salinizzazione del suolo (evaporazione ed evapotraspirazione dell'acqua presente nel suolo e conseguente deposito dei sali), talora già di per sé salato, per via dell'origine da sedimenti di lagune salmastre costiere.

The LIFE AGROWETLANDS II - *Smart water and soil salinity management in agro-wetlands* - LIFE15 ENV/IT/000423 project was co-financed with almost 600,000 euros under the LIFE 2014-2020 Programme, Sub-programme Environment and Efficient Use of Resources, and it was active from September 2016 to June 2020.

The project investigated aspects concerning the use of innovative technologies applied in agriculture, suitable for being replicated, transferred or integrated, as required by European policies and legislation on efficiency in the use of environmental resources.

With the aim of optimizing the quantity of water used for irrigation, maintaining production and preserving soil functionality at best, LIFE AGROWETLANDS II has developed a Decision Support System, called *Smart Agrowetlands*, dedicated to the management of irrigation in areas subject to water and soil salinization phenomena.

The project operated in an area close to the Adriatic coast in the province of Ravenna, at the Agrisfera farm, partner of the project itself. The area is characterized by processes of intrusion of sea water into the surface aquifer and along the terminal part of the waterways, due to the subsidence (up to 1.5 mm / year), generated by multiple causes, and the general rise of the sea level. The presence of a rather superficial salty aquifer determines soil salinization phenomena (evaporation and evapotranspiration of the water present in the soil and consequent deposit of salts), sometimes already salty in itself, due to the origin of sediments from coastal brackish lagoons.



*Vista di una parte dell'area di progetto immediatamente a Nord del fiume Lamone e fino alla foce del Canale di Bonifica in Destra Reno*

*View of a part of the project area immediately North of the Lamone river and up to the mouth of the Drainage Canal on the Destra Reno*

Per il raggiungimento dell'obiettivo generale del progetto, sono stati progressivamente concretizzati degli obiettivi parziali, perseguiti tenendo conto degli orientamenti più recenti dell'agricoltura di precisione oltre che della loro evoluzione nel corso del tempo di svolgimento del progetto.

L'area di progetto è stata dunque attrezzata con una rete wireless di sensori, costituita da 23 nodi per la misura in continuo di umidità, temperatura, conducibilità elettrica del suolo, nonché livello, temperatura, conducibilità elettrica dell'acqua dei canali e di falda. A questo insieme di sensori vanno aggiunte, sempre come parte della rete, due stazioni

In order to achieve the general objective of the project, partial objectives have been progressively materialized, pursued taking into account the most recent guidelines of precision agriculture as well as their evolution over the course of the project.

The project area was therefore equipped with a wireless network of sensors, consisting of 23 nodes for the continuous measurement of humidity, temperature, electrical conductivity of the soil, as well as level, temperature, electrical conductivity of the canal and groundwater. To this set of sensors must be added, still as part of the network, two complete meteorological stations, including sensor for measuring the incident



meteorologiche complete, inclusi sensore per la misura dell'energia solare incidente. A differenza di altre reti, oggi abbastanza diffuse nell'ambito di singole aziende, la WSN AGROWETLANDS è una rete di dimensioni territoriali, che copre una superficie di circa 30 km<sup>2</sup>, pensata per servire più agricoltori. A questi si vuole però fornire un consiglio irriguo personalizzato, in funzione della situazione ambientale che risulta dai rilevamenti effettuati dai sensori. La particolare delicatezza del problema affrontato, l'irrigazione su suoli salini, si giova certamente di una buona precisione nella definizione delle condizioni in cui vanno praticati gli interventi irrigui.

I dati registrati in continuo dalla rete, vengono trasmessi ad un server e utilizzati dal DSS *Smart Agrowetlands* per formulare i consigli irrigui per gli agricoltori dell'area, in funzione dei valori assunti dai parametri ambientali monitorati.

I consigli irrigui vengono forniti agli agricoltori dal DSS, anche tramite *smartphone*; essi si basano sul modello Aquacrop della FAO. Si tratta di un modello di uso abbastanza facile, che richiede un numero relativamente ridotto di parametri di *input* e che fornisce come *output* un ampio insieme di informazioni. Queste riguardano non solo il consiglio irriguo vero e proprio, ma vengono proposte anche come previsioni quantitative e via via più precise sulla biomassa finale ottenibile, in funzione del procedere della stagione colturale e dei trattamenti effettuati, registrati dall'agricoltore nel sistema.

Rispetto agli scopi che il progetto si proponeva di raggiungere, è stato fatto un importante approfondimento sulle opportunità offerte dall'utilizzo di immagini satellitari gratuite, ottenute da LANDSAT-8 e da SENTINEL-2, in accompagnamento con i consigli irrigui. Le immagini satellitari consentono, infatti, di

solar energy. Unlike other networks, now quite widespread within individual companies, WSN AGROWETLANDS is a network of territorial dimensions, covering an area of about 30 km<sup>2</sup>, designed to serve more farmers. To these, however, we want to provide personalized irrigation advice, according to the environmental situation that results from the detections carried out by the sensors. The particular delicacy of the problem addressed, irrigation on saline soils, certainly benefits from good precision in defining the conditions in which irrigation interventions are to be practiced.

The data continuously recorded by the network are transmitted to a server and used by DSS *Smart Agrowetlands II* to formulate irrigation advice for farmers in the area, according to the values assumed by the monitored environmental parameters.

The irrigation advice is provided to farmers by the DSS, also via *smartphone*; they are based on FAO's Aquacrop model. It is a fairly easy to use model, which requires a relatively small number of input parameters and which provides a large set of information as output. These concern not only the actual irrigation advice, but are also proposed as quantitative and gradually more precise forecasts on the final biomass obtainable, according to the progress of the growing season and the treatments carried out, recorded by the farmer in the system.

With respect to the aims that the project intended to achieve, an important study was made on the opportunities offered by the use of free satellite images, obtained by LANDSAT-8 and SENTINEL-2, in conjunction with the irrigation suggestions. The satellite images allow, in fact, to periodically know, almost in real time and at an area level, the state of well-being / suffering of the crops, made evident by the calculation of appropriate parameters (NDVI, Crop Water Stress Index, effective evapotranspiration). The repetitive spatial patterns that result from the



conoscere periodicamente, quasi in tempo reale e a livello areale, lo stato di benessere/sofferenza delle colture, reso evidente tramite il calcolo di opportuni parametri (NDVI, Crop Water Stress Index, evapotraspirazione effettiva). I pattern spaziali ripetitivi che risultano dalla comparazione di una serie di immagini temporali, rappresentano un'importante base di conoscenza per la messa a punto di interventi agronomici mirati, non solo irrigui, a rateo variabile, secondo un approccio proprio dell'agricoltura di precisione.

Il progetto LIFE AGROWETLANDS II è stato dunque in grado di fornire spunti che vanno oltre gli scopi definiti alla partenza dal progetto stesso. Questi risultati aggiuntivi, sviluppati in corso d'opera, contribuiscono alla messa a punto di sistemi di gestione delle colture specificamente mirati, utili al miglioramento della sostenibilità dei sistemi agricoli che li adottano.

Nelle pagine che seguono, la traccia dei contenuti del progetto e del suo svolgersi, che è stata qui delineata, viene sviluppata con maggior dettaglio nei suoi vari aspetti.

comparison of a series of temporal images, represent an important knowledge base for the development of targeted agronomic interventions, not only irrigated, with variable rate, according to an approach precisely of precision agriculture.

The LIFE AGROWETLANDS II project was therefore able to provide ideas that go beyond the aims defined at the start of the project itself. These additional results, developed during construction, contribute to the development of specifically targeted crop management systems, useful for improving the sustainability of the agricultural systems that adopt them.

In the following pages, the outline of the contents of the project and its development, which has been outlined here, is developed in greater detail in its various aspects.

## 2. CARATTERIZZAZIONE AMBIENTALE DELL'AREA DI PROGETTO

### 2.1 - IDENTIFICATION OF THE PROJECT AREA

The project area is located in a narrow strip of land between two large coastal brackish lagoons: “Valli di Comacchio” in the north and “Pialasse della Baiona” in the south, and the Adriatic Sea in the east (Fig. 2.1.1). This land strip includes a large cropland area, where Agrowetlands II project was implemented, and is surrounded by several seminatural areas, mostly wetlands, that are protected and actively managed for nature conservation by the regional nature reserve “Parco del Delta del Po”. The protection is due to the occurrence of one of the largest water birds population in Europe (Birds Directive 79/409/EEC), occurring in the Po Delta,

and of several habitats shortlisted in the Annex 1 of the Habitats Directive (92/43/EEC), mostly associated with brackish plant communities and rare species. This land was once a system of coastal dunes and lagoons and was drained in 1920s and 30s. It is evident from the location and the complex artificial water network that agriculture in this area is challenging and relies on the availability of freshwater for irrigation. The most vulnerable areas are those close to the coast because of sea water intrusion into the ground and superficial water bodies (Fig. 2.1.2). Other factors that contribute to salinization are salt from sediments reclaimed from brackish lagoons, intense evaporation during the summer and irrigation with poor quality water.

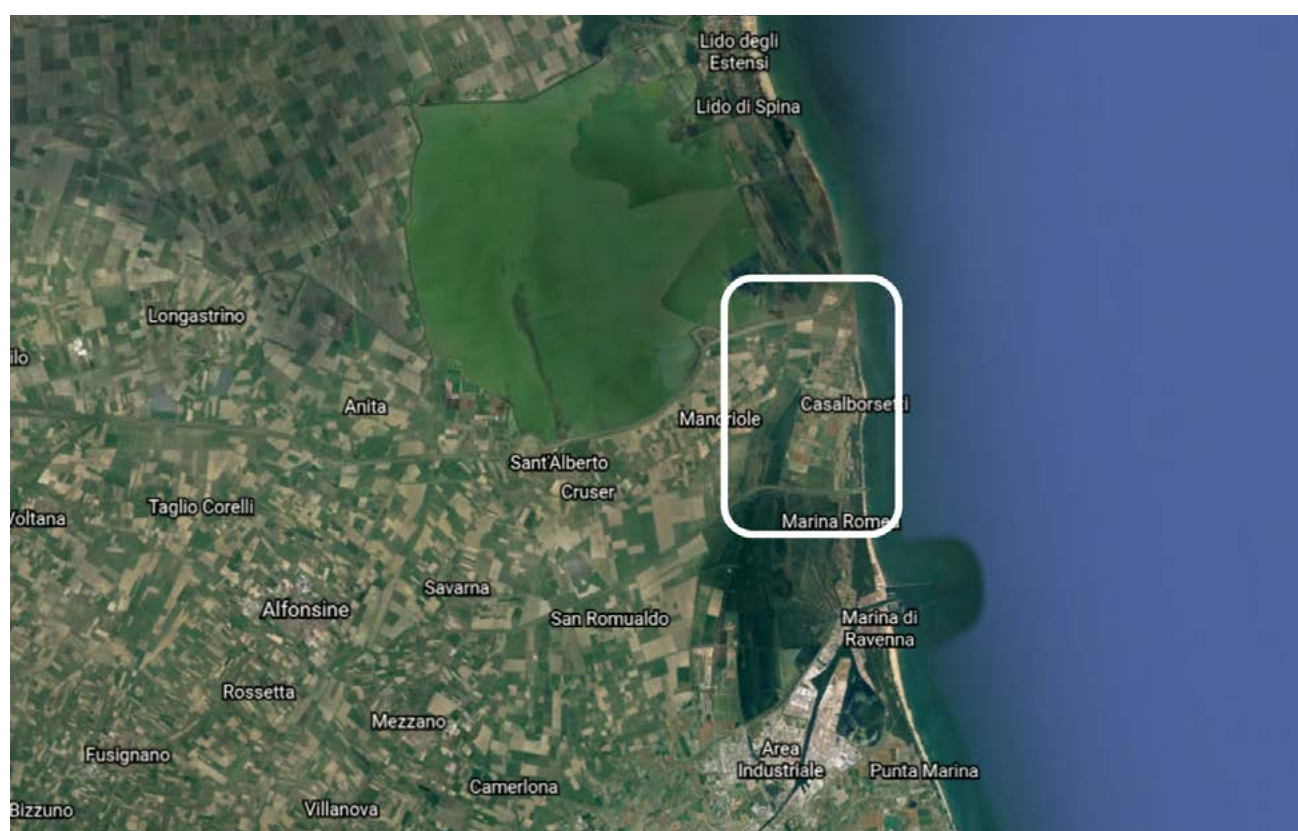


Figura 2.1.1. - Il riquadro indica l'area in cui è stato realizzato il progetto LIFE Agrowetlands II.

Figure 2.1.1. - The frame indicates the area where LIFE Agrowetlands II project was carried out.

## 2.1 - IDENTIFICAZIONE DELL'AREA DI PROGETTO

L'area in cui è stato realizzato il progetto LIFE Agrowetlands II si colloca sulla costa Adriatica settentrionale ai margini est della Pianura Padana, e si estende in direzione E-O dalla costa fino a circa 3 km verso l'interno. L'area è localizzata in una striscia di terra tra due grandi aree umide salmastre: la "Valle di Comacchio" a nord e la "Pialassa della Baiona" a sud, e il mare Adriatico a est (Fig. 2.1.1).

Questo territorio, occupato fino al XIX secolo da un sistema di dune e lagune salmastre costiere, risulta oggi profondamente trasformato dalle attività di bonifica degli anni '20 e '30 del XX secolo e prevalentemente dedicato all'agricoltura. Questa striscia di terra oggi comprende un'ampia area agricola e un sistema di aree seminaturali protette, in particolare aree umide, come la Valle della Canna, il Bardello, la Pineta storica di S. Vitale, che insieme alla Valle di Comacchio e le Pialasse della Baiona sono gestite dal Parco regionale del Delta del Po. Il regime di protezione è dovuto alla presenza di una delle popolazioni di uccelli acquatici più grande in Europa legata agli ambienti deltizi del Delta del Po (Direttiva Uccelli 79/409/CEE), alla presenza di un elevato numero di habitat di interesse comunitario (Direttiva Habitat 92/43/CEE) legati

principalmente agli ambienti salmastri tipici degli ecosistemi lagunari, e di specie rare con uno stato di conservazione critica, o minacciate di estinzione. È evidente, dalla localizzazione geografica e dall'idrografia artificiale complessa dettata dalla necessità di mantenere quest'area asciutta, che le sfide legate alla coltivazione sono molteplici, e che la disponibilità di acqua dolce per l'irrigazione, così come la presenza di corpi di acqua dolce, sia superficiali che profondi, sono fondamentali per contrastare la salinizzazione e mantenere l'agricoltura. Le aree prossime alla costa sono quelle più vulnerabili alla salinizzazione, per via dell'ingressione di acqua marina salata nell'acquifero freatico e della risalita di acqua marina in corrispondenza dei corsi d'acqua (Fig. 1.1.2). Altre cause di salinizzazione, sono legate all'origine dei suoli dai sedimenti di lagune salmastre, prosciugate dalle opere di bonifica, e all'intensa evaporazione estiva. L'irrigazione con acqua con elevata conducibilità elettrica è infine un altro fattore che minaccia quest'area di salinizzazione. La salinizzazione dei suoli è un fenomeno che interessa tutta la regione Mediterranea ed è destinato a perdurare e peggiorare per via del cambiamento climatico in corso. La salinizzazione è accompagnata da erosione e desertificazione.



**Figura 2.1.2.** - Sbarramento di Volta Scirocco sul fiume Reno che impedisce la risalita di acqua marina nel corso del fiume. (Foto Kepler Video).

**Figure 2.1.2.** - Volta Scirocco barrage in Reno River. The barrage protects the river from marine intrusion along its course. (Photo Kepler Video).

## 2.2 - CLIMATE

Technically the project area is in the Central European biogeographic region with continental climate, mitigated, by the Adriatic Sea, by cool summers without dry season and mild winters. The meteorological data recorded by ARPA stations in the Ravenna province indicate a climatic change in the last 10 years towards a Mediterranean climate with summer drought in the months of June, July and August (Fig. 2.2.1.) The analysis of historic data shows a 26% reduction in average precipitation compared to the 1970-2000 period. These data, combined with soil water percentile data indicate

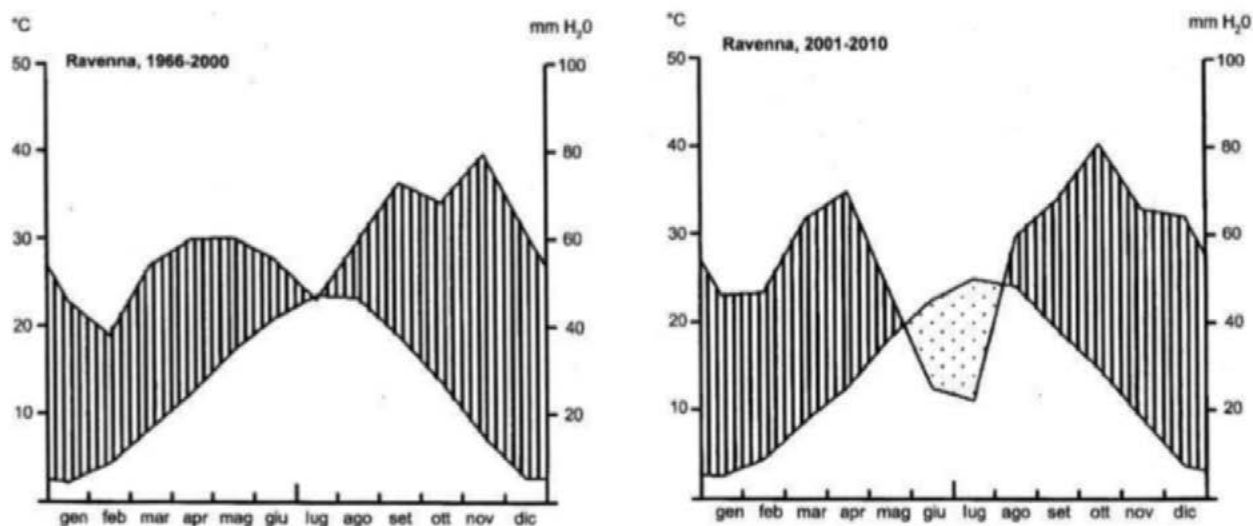
## 2.2 - CONDIZIONI CLIMATICHE

Tecnicamente l'area del progetto si trova nella regione biogeografica dell'Europa centrale con clima continentale, mitigato, in prossimità del Mare Adriatico, da estati fresche e umide, senza stagione secca, e inverni miti.

I dati meteorologici raccolti dalle stazioni meteorologiche ARPA nel ravennate indicano tuttavia un cambiamento nell'ultimo decennio verso un clima di tipo Mediterraneo

"exceptional drought" (Regione Emilia-Romagna, 2018). According to the more recent climatic model of Metzger et al. (2005), the climate in the project area can be classified as Mediterranean North type, with summer drought and humid winters. Concerning crops requirements, the temperature exceeds 10 °C for more than 7 months/year with frequent drought periods during the summer. July is the driest month and irrigation may be indispensable in this month. Potential evapotranspiration is lowest in December and January with values below 200 mm/month, and highest in the month of July with peaks of about 160 mm/month (Fig. 2.2.2.)

con siccità estiva nei mesi di giugno, luglio e agosto (Fig. 2.2.1). L'analisi eseguita su dati storici delle stazioni ARPA indica una riduzione del 26% della piovosità media rispetto al trentennio di riferimento 1970-2000. I dati meteorologici, combinati con il dato percentuale di acqua disponibile nel terreno evidenziano "livelli di siccità eccezionale" (Regione Emilia-Romagna, 2018).



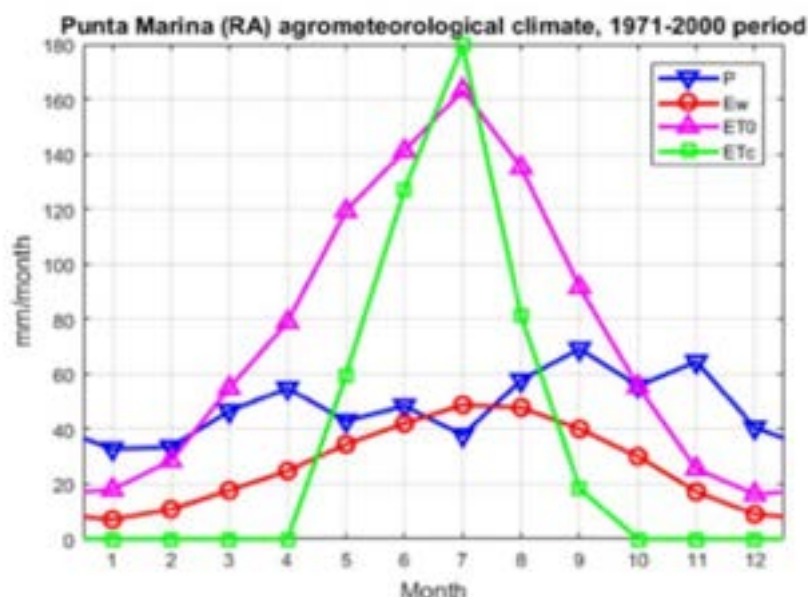
**Figura 2.1.2.** - Diagrammi ombrotermici Bagnouls-Gaussien. Confronto periodo 1966-2000 e 2001-2010. (Immagine da Regione Emilia-Romagna 2018, SIC/ZPS IT4070001 Ponte Alberete, Valle Mandriole).

**Figure 2.1.2.** - Bagnouls-Gaussien's ombrothermic diagram. Comparison between the period 1966-2000 and 2001-2010. (Image from Regione Emilia-Romagna 2018, SIC/ZPS IT4070001 Ponte Alberete, Valle Mandriole).



Secondo la classificazione climatica più recente di Metzger et al. (2005), il clima nell'area del progetto é di tipo Mediterraneo Nord, caratterizzato da inverno umido e siccità estiva. Da un punto di vista strettamente colturale il clima presenta un lungo periodo di oltre 7 mesi/anno con temperatura  $>10^{\circ}\text{C}$  favorevole per la crescita delle colture, e frequenti, a volte prolungati, periodi di siccità durante la stagione estiva. Il mese di luglio è il mese più secco durante il quale l'irrigazione può diventare indispensabile. L'evapotraspirazione potenziale è minima nei mesi

di dicembre e gennaio con valori inferiori a 20 mm/mese e massima nel mese di luglio con picchi di circa 160 mm/mese (Fig. 2.2.2). Complessivamente dal confronto fra precipitazioni ed evapotraspirazione potenziale emerge un periodo umido nei mesi da novembre a febbraio, con precipitazione superiore alla capacità di evapotraspirazione, ed un periodo secco nel periodo da aprile a settembre, caratterizzato dal prevalere della capacità di evapotraspirazione, con marzo e ottobre mesi di transizione.



**Figura 2.1.3.** - Condizioni agrometeorologiche dell'area nel trentennio 1971-2000. P: precipitazione mensile; Ew: evapotraspirazione discriminante secondo Walter & Lieth (1967); ET0: evapotraspirazione potenziale di riferimento; ETc: evapotraspirazione potenziale da una coltura di mais. Da: Masina et al. (2019)

**Figure 2.1.3.** - Agrometeorological conditions of the area in the thirty years 1971-2000. P: monthly precipitation; Ew: discriminant evapotranspiration according to Walter & Lieth (1967); ET0: reference potential evapotranspiration; ETc Potential evapotranspiration from a maize crop. From: Masina et al. (2019)

## 2.3 - GEOMORPHOLOGY

The area is characterized by the alternation of dune bars and interdunal depressions filled with silt-clayey sediments.

## 2.3 - GEOLOGIA E SISTEMA DEPOSIZIONALE

Nell'area di studio si sono verificate diverse unità deposizionali sedimentarie (SGI, 1999) in cui si possono evidenziare (Figura 2.3.1): a) depositi alluvionali di sabbia e

limo (ADS) e b) di argilla limosa e limo argilloso (ADC); c) depositi deltaici di sabbia limosa e argilla ricca di sostanza organica (DDC); depositi costieri sabbiosi (DCS) e argillosi limosi (CDA).

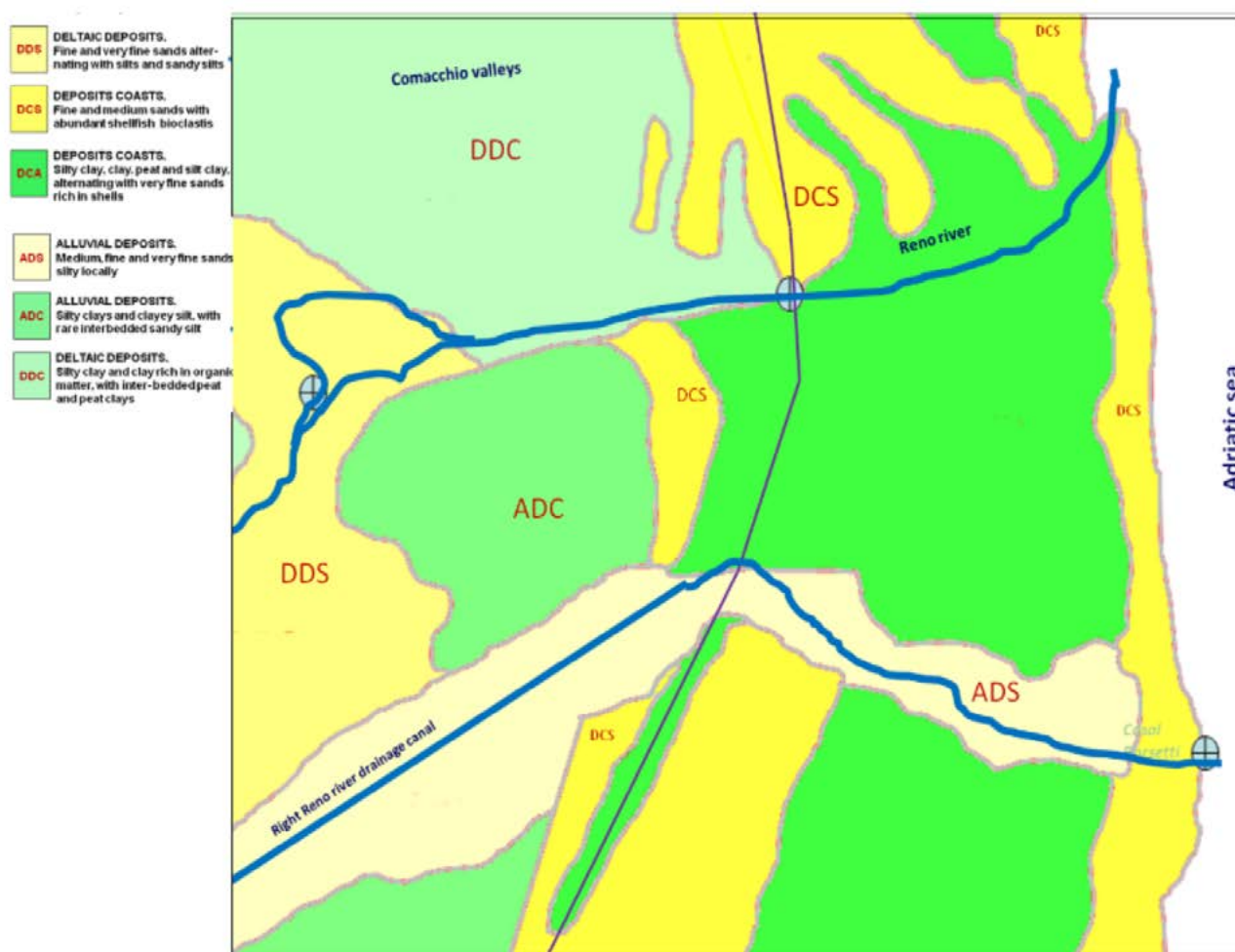


Figura 2.1.3. - Depositi alluvionali nell'area del progetto.

Figure 2.1.3. - Alluvial deposits in the project area.

Morfologia. Il "Modello Digitale del Terreno" (Digital Terrain Model, DTM), è stato costruito in QGIS, derivato dalla elaborazione da Lidar, mostra che circa il 60% dell'area di studio presenta una morfologia con altitudini al di sotto del livello del mare che a volte raggiungono -2 m slm (Figura 2.3.2). Altitudini superiori a 1 m slm si

estendono lateralmente al canale di drenaggio Reno destro che in passato ospitava l'antico corso del fiume Lamone frequentemente colpito da inondazioni. Sopra i 2 m slm le fasce del territorio corrispondono alle antiche strutture delle dune (Figura 2.3.2).

Si possono quindi valutare le zone morfologicamente più depresse tra le due dune costiere, parallele alla linea di costa. La zona di maggiore depressione a nord si evidenzia in destra Fiume Reno, adiacente alle valli di Comacchio.

Si può evincere interpretando la Figura 2.3.1 e la Figura 2.3.2 che i depositi costieri prettamente limoso-argillosi sono presenti nelle aree morfologicamente meno rilevate, intradunali, inclusi in quelli maggiormente sabbiosi.



**Figura 2.3.2.** - *Digital Terrain Model (DTM) ottenuto dall'elaborazione GIS di LIDAR in toni di grigio. Le parti scure sono le zone morfologicamente più depresse. Elaborazione della carta da parte di Massimo Gherardi (Boreal Mapping).*

**Figure 2.3.2** - *Digital Terrain Model (DTM) from LIDAR GIS elaboration in gray colours. Dark parts are, morphologically, the lowest ones. Map's elaboration by Massimo Gherardi (Boreal Mapping).*



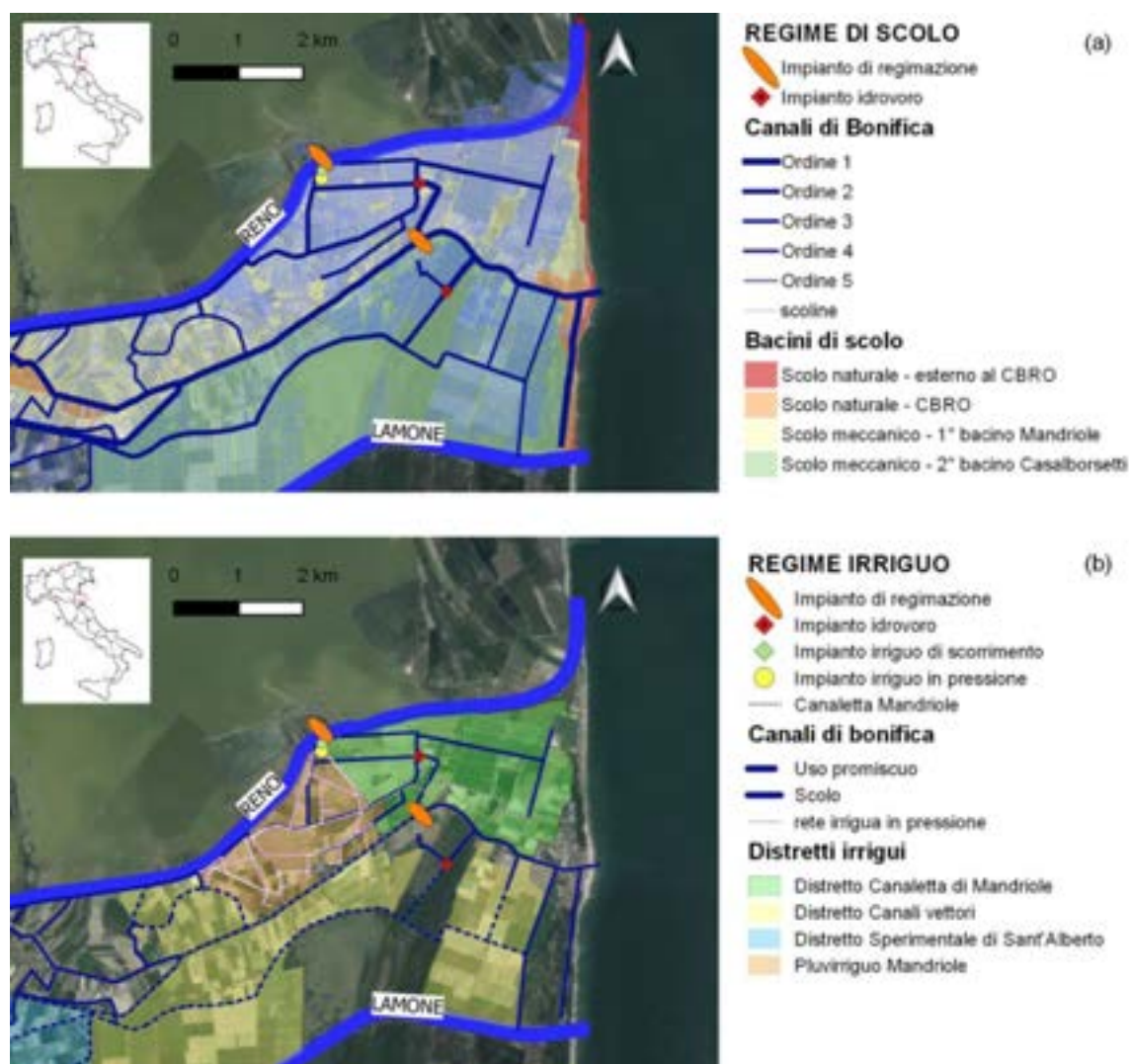
## 2.4 - SURFACE-WATER HYDROLOGY AND SALINITY

The pilot site has a total surface of about 60 km<sup>2</sup> mostly located close or below the sea level. The draining system consists of 69 km of channels and two dewatering pump stations that can guarantee water table minimum depth in the fields. It means that draining is almost exclusively mechanical. Channels have the primary function of draining and, some of them, a secondary function of irrigation. Rainfall does not cover crops water demand and, for this reason, irrigation begins in March and ends late in the summer. Irrigation water is from River Reno and the Destra Reno Draining Channel (CBDR). Between 01/12/2016 and 01/10/2017 a monitoring campaign of surface-water flow rate, levels, and salinity was carried

out. The results show that 79% of water samples collected in winter have higher salinity than those collected in the summer. Since 2018, 11 measurement stations, connected by a wireless sensors network (WSN), and equipped with flow and EC meters have been monitoring channels water quality and quantity. The recorded data show that water level changes according to rainfall, pumps activation, and channels management. In general, brackish water flows in all channels and EC values are highest during the winter season (EC >4 dS/m) because soil leaching is higher and the water table is shallower than during the summer, but most of all because large volumes of high quality water are pumped into the channels network during the irrigation season reducing EC values below the threshold of 2 dS/m.

## 2.4 - IDROLOGIA SUPERFICIALE E SALINITÀ

L'area del progetto (Fig. 2.4.1) costituisce la quasi totalità del comparto idraulico "Savarna-Sant'Alberto-Mandriole" in gestione al Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale. Comprende circa 60 km<sup>2</sup> di territori rurali ed agricoli, nonché zone umide, salmastre e non, soggette a protezione speciale per il particolare ecosistema che vi ospitano.



**Figura 2.4.1.** - Area del progetto: nel pannello (a) è riportato l'assetto della rete in regime di scolo, in particolare sono evidenziati i canali di bonifica con spessore crescente in funzione dell'ordine, i principali bacini di scolo, la localizzazione degli impianti idrovori e le opere di regimazione; il pannello (b) illustra l'assetto della rete in regime irriguo, in particolare si sono distinti i canali di bonifica con uso di scolo da quelli ad uso promiscuo (canali vettori), i distretti irrigui, la rete tubata in pressione del distretto pluvirriguo Mandriole, la canaletta Mandriole che alimenta a gravità con acqua derivante dal fiume Reno il relativo distretto irriguo.

**Figure 2.4.1** - Project area: Figure (a) shows the channels network in draining mode. Thickness of draining channels increases according to channels ranking. The figure also shows the main draining catchments, the location of water pumps and hydrological works. Figure (b) shows the channels network in irrigation mode. The draining channels are distinct from those used both for draining and irrigation (vector channels). Figure (b) also shows irrigation districts, the pressurized piping network of Mandriole sprinkler irrigation district and Mandriole pipeline. Mandriole pipeline transports irrigation water from the Reno River by gravity to all district.

Dal punto di vista altimetrico tutto il territorio, oggetto di bonifica idraulica all'inizio del secolo scorso, si trova in prossimità o al di sotto del livello del mare. Il drenaggio è quindi effettuato quasi unicamente per via meccanica mediante due impianti idrovori che garantiscono il mantenimento del franco di coltivazione. I circa 69 km di canali costituenti la rete idraulica di bonifica (Fig. 1.4.1a) possiedono in generale una funzione primaria di scolo, per il mantenimento della sicurezza idraulica ed una accessoria di irrigazione (Fig. 1.4.1b). Il Canale di Bonifica in Destra di Reno (CDR), che percorre l'area di studio in senso est-ovest parallelamente al fiume Reno, è l'unico canale del comparto che scarica a gravità verso il mare Adriatico e risulta arginato su entrambe le sponde lungo tutta la sua estensione.

Divide l'area in due bacini di drenaggio indipendenti denominati Primo Bacino Mandriole (1BM) a nord e Secondo Bacino Casalborgsetti (2BC) a sud (Fig.1.4.1a). Tali bacini scolano per sollevamento meccanico nel CDR attraverso altrettanti impianti idrovori le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 1.4.1. Gli impianti di regimazione indicati in Fig. 2.4.1 sono la traversa di Volta Scirocco sul fiume Reno e il Ponte Chiavica sul CDR che ha una funzione principale di chiavica emissaria per la regimazione delle acque del CDR, regolando le quote del pelo libero a monte e a valle di essa in relazione all'andamento delle maree e dei tiranti minimi necessari per il prelievo irriguo ed impedendo la risalita dell'acqua salmastra.

Nome Impianto	Area drenata [km <sup>2</sup> ]	Rete scolante [km]	Prevalenza max [m]	Portata max [l/s]
Primo Bacino Mandriole (1BM)	18,99	27,48	4.35	6000
Secondo Bacino Casalborgsetti (2BC)	47,37	39,31	2.96	8605

**Tabella 2.4.1.** - *Caratteristiche degli impianti idrovori presenti nell'area di studio.*

**Table 2.4.1.** - *Specifications of the water pumps in the project area.*

L'attività irrigua, che deve sopperire alla siccità estiva, inizia generalmente nel mese di marzo e termina nel mese di ottobre-novembre. La derivazione per uso irriguo è eseguita sulle acque del fiume Reno, in corrispondenza della traversa di Volta Scirocco, e nel CDR in località Sant'Alberto. La distribuzione viene svolta tramite alimentazione diretta a gravità dei canali ad uso promiscuo della rete consortile, tramite la canaletta Mandriole con distribuzione a gravità e tramite un sistema di condotte in pressione (Fig. 2.4.1b).

L'area è suddivisa in 3 distretti irrigui le cui principali proprietà sono riassunte in Tabella 2.4.2.

La rete dei canali è ad uso promiscuo di scolo e irrigazione. La funzione di scolo per la sicurezza idraulica è prioritaria e si esplica prevalentemente nel periodo invernale, da inizio novembre a fine marzo. In regime di scolo i canali vengono tenuti a livelli minimali. Nei mesi estivi il regime irriguo è prevalente e i canali vengono tenuti semipieni, vedi figura 2.4.2.

Nome Comparto irriguo	Area irrigata [km <sup>2</sup> ]	Tipo distribuzione
C.E.R. – canali vettori	18,55	Gravità
Canaletta di Mandriole	7,93	Gravità
Pluvirriguo Mandriole	4,67	Tubata in pressione

**Tabella 2.4.2.** - *Caratteristiche dei comparti irrigui presenti nell'area di studio.*

**Table 2.4.2.** - *Specifications of the irrigation districts in the project areas.*

Nel periodo 01/12/2016-01/10/2017 l'area di studio è stata oggetto di un dettagliato campionamento ambientale volto alla mappatura della salinità

dell'acqua transitante nei canali e alla misura dei livelli e delle portate durante il ciclo idrologico annuale.



**Figura 2.4.2.** - Misure di portata nel canale di Bonifica Rivalone mediante l'utilizzo di un misuratore di livello ad ultrasuoni ed effetto doppler (ADCP). (Foto Sara S. Cipolla)

**Figure 2.4.2.** - Water flow measurement in Rivalone draining channel with an acoustic doppler current profiler (ADCP). (Photo Sara S. Cipolla)

### Salinità

Le misure di conducibilità elettrica (EC) sono state effettuate in 31 siti durante la stagione irrigua e quella invernale e i dati risultanti sono stati organizzati in 4 classi (0- 0.5; 0.5-1.5; 1.5-4; >4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Quando il valore di EC è inferiore a 1.5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  l'acqua ha una qualità idonea all'irrigazione, quando il valore di EC è nel range 1.5-4-0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  l'acqua può essere utilizzata ai fini irrigui ma è necessario effettuare delle valutazioni sulle colture, sui suoli e sul sistema di drenaggio. Quando il valore di EC eccede 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  l'acqua non è idonea all'irrigazione

(Rhoades et al. 1992).

La Tabella 2.4.3 mostra i valori di conducibilità elettrica (EC) misurata nei canali di bonifica del comparto (69 km) nel corso dell'anno. Il 79% dei campioni raccolti in inverno è caratterizzato da un elevato valore EC, che scende gradualmente in primavera raggiungendo il minimo nel mese di luglio. Ciò è imputabile al fatto che, durante il periodo estivo, il Consorzio di Bonifica fa circolare nei canali grandi volumi di acqua di buona qualità che si mescolano con acqua salmastra presente nei canali, ottenendo così acqua di qualità accettabile



per l'irrigazione.

Nell'anno 2018 si è proceduto con la progressiva installazione di misuratori di livello e di salinità in alcuni punti significativi della rete di bonifica con l'obiettivo di effettuare un monitoraggio quali/quantitativo in continuo. La Tabella 2.4.4 sintetizza le principali caratteristiche degli 11 misuratori di livello presenti nella rete WSN realizzata nell'ambito del progetto (vedi capitolo 1.9: La Rete Wireless di Sensori (WSN) realizzata da LIFE AGROWETLANDS II e le informazioni su salinità delle acque e del suolo) mentre la Figura 1.4.3 mostra la loro distribuzione

planimetrica. A valle dell'installazione dei sensori che forniscono la misura del tirante idrico rispetto al fondo del canale e della relativa conducibilità elettrica si è effettuato un rilievo topografico volto alla determinazione della quota assoluta del fondo dei canali nelle sezioni in cui sono installati i sensori (Fig.2.4.4).

A decorrere dalla relativa data di installazione, si è proceduto con l'acquisizione automatica con un time step di 10 minuti dei valori di livello, temperatura e conducibilità elettrica in ogni idrometro della rete.

EC [ $\mu$ S/cm]	Dicembre 2016	Maggio 2017	Giugno 2017	Luglio 2017	Agosto 2017
<0.5	0%	0%	3%	0%	0%
0.5-1.5	7%	21%	52%	81%	61%
1.5-4	14%	45%	26%	6%	23%
>4	79%	34%	19%	13%	16%
Tot. campioni	28	29	31	31	31

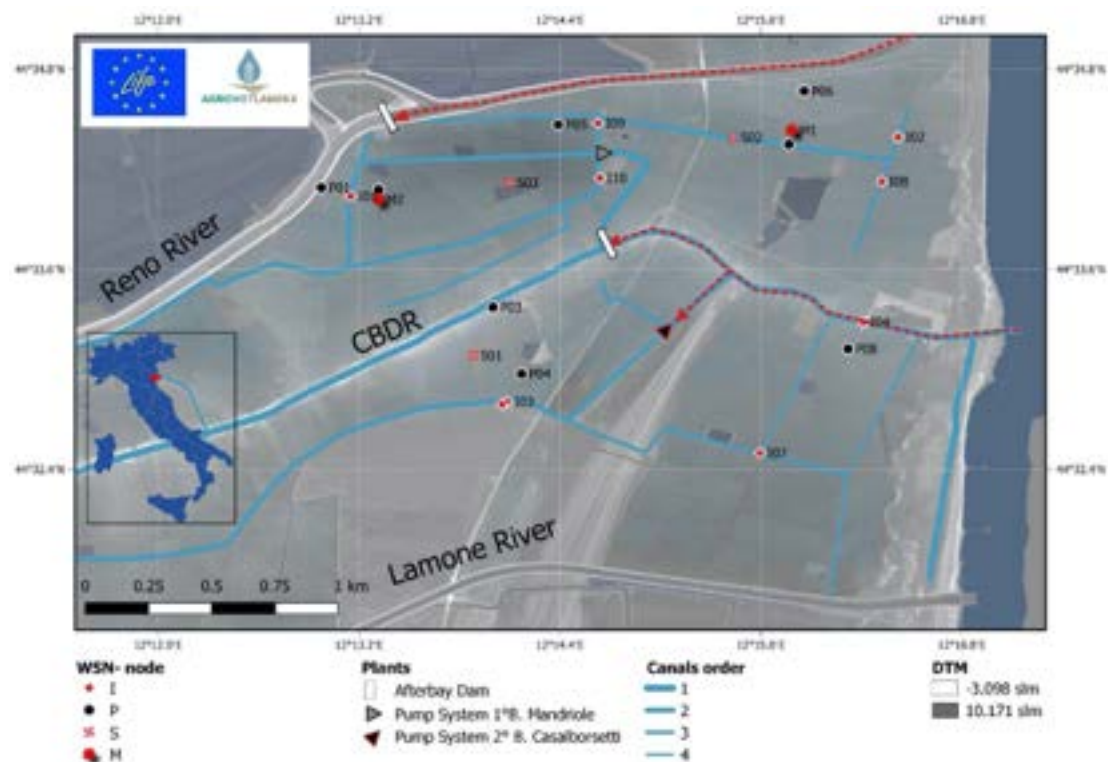
**Tabella 2.4.3.** - Percentuali associate a ciascuna classe di conducibilità elettrica (EC) suddivise per periodo di campionamento e relativo numero totale di campioni raccolti.

**Table 2.4.3.** - Percentages associated with each electrical conductivity class (EC) per sampling period and total number of samples.

RETE	ID	Tipo di sensore	ID Canale	Data di installazione
GATTOLO INFERIORE	I01	CTD-10	Acque basse S.Alberto	01/01/2018
AUGUSTA	I03	CTD-10	Rivalone	29/03/2018
	I11	CTD-10	Valle della canna	29/03/2018
MARCABO' EST	I02	CTD-10	Trasversale Busona ramo nord	16/03/2018
	I08	CTD-10	Trasversale Busona ramo sud	16/03/2018
MARCABO' OVEST	I10	CTD-10	Acque medie S.Alberto	06/04/2018
	I09	CTD-10	Busona	06/04/2018
BARONIA	I04	CTD-10	CBDR in prossimità della foce	04/12/2018
	I07	CTD-10	Baronia	16/03/2018
S. ALBERTO	I05	CTD-10	Rivalone a Sant'Alberto	04/12/2018
	I06	CTD-10	CBDR a Sant'Alberto	04/12/2018

**Tabella 2.4.4.** - Nome della rete, ID sensore, Tipologia di sensore installato, Nome del canale sul quale è installato il sensore e relativa data di installazione.

**Table 2.4.4.** - Network name, sensor ID, sensor type, name of the channel in which the sensor was installed and installation date.



**Figura 2.4.3.** - Planimetria dell'area di studio e distribuzione spaziale dei sensori della rete WSN che è composta dai seguenti elementi: idrometri (I), piezometri (P), misuratori su suolo (S), stazioni meteo (M).

**Figure 2.4.3.** - Map of the project area and location of the WSN sensors. The WSN includes hydrometers (I), piezometers (P) soil sensors (S) and meteorological stations.



**Figura 2.4.4.** - Rilevo topografico del fondo dei canali di bonifica in corrispondenza dell'idrometro I09. (Foto Sara S. Cipolla).

**Figure 2.4.4.** - Topographical survey of the channel bed close to the hydrometer I09. (Photo Sara S.Cipolla).

## 2.5 - GROUNDWATER AND SALINITY

The geological structure of the study area and the permeability of the aquifer are described. The phreatic aquifer develops in a sandy layer formed in ancient coasts, which emerges today mainly in two dune systems: that of the current coast and that of the medieval coast. Behind the dunes silt deposits of various thicknesses with an agricultural vocation have formed. The permeability pattern follows the sedimentary structure: it is elevated,

around 10-4 cm/s in the dunes and around 10-8 cm/s in the clayey silt deposits in which crops are practiced. Near the sea or where the sandy groundwater is in connection with the waters of brackish lagoons, the salinity is strong while at the internal edge of the area the groundwater is weakly saline. In the irrigated areas a stratification is evident, the interface between the overlaying fresh water and saline water moves vertically as a consequence of effective precipitation and irrigation.

## 2.5 - FALDA FREATICA E SALINITÀ

Per la rappresentazione dell'acquifero costiero e delle sue interazioni con la rete superficiale dei canali di irrigazione/drenaggio e con i suoli agricoli dell'area sono state consultate ed integrate varie fonti di informazione: mappe antiche, studi sull'assetto geologico strutturale, geomorfologico ed idrogeologico della zona in esame e dell'area circostante (Aquater, 1988; Amorosi et al., 1999; Amorosi & Marchi, 1999; Ciabatti et al., 2006; Bonzi et al., 2010; Campo et al., 2017), sezioni e prove geognostiche, prevalentemente penetrometrie e sondaggi, contenute nel database del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna Romagna ([https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia\\_sgss/user/viewer.jsp?service=geologia](https://applicazioni.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=geologia)) e indagini in sito a supporto della pianificazione territoriale ed urbanistica del Comune di Ravenna (<http://rup.comune.ra.it/RUE>).

Per ottenere una robusta descrizione dell'acquifero costiero e fornire adeguate condizioni al contorno all'effettiva area di studio, sono stati interpretati e processati i sondaggi e le prove penetrometriche disponibili per un'area più estesa, delimitata dal Canale Gobbino a Nord al confine con la Provincia di Ferrara e gli abitati di Punta Marina (RA) a Sud ed Alfonsine (RA) ad Ovest.

La distribuzione delle prove geognostiche è fortemente irregolare, si addensa nelle zone antropizzate ed è lacunosa nelle zone vallive. Inoltre, meno di un terzo delle prove analizzate risulta caratterizzato da una profondità sufficiente a descrivere l'intera sequenza di deposizione olocenica.

Alcune migliaia di log stratigrafici fittizi di piccola profondità sono stati aggiunti ai precedenti per introdurre l'informazione diffusa sulla natura degli strati superficiali del terreno.

Indicazioni utili per la definizione del contorno a mare del sistema acquifero sono state derivate dall'esame di carte storiche, dalle Note Illustrative della Carta Geologica (Amorosi ed., 1999), dalla Carta Geologica dei Mari Italiani (Fabbri & Trincardi ed., 2001), dall'analisi dei risultati delle campagne sedimentologiche eseguite sui litorali dell'Emilia-Romagna dall'Università di Ferrara (Bondesan et al., 1978), da Idroser (1995) e da Arpa Emilia-Romagna (2016) e dalle elaborazioni dei profili sismici ad alta risoluzione acquisiti in prossimità della costa regionale dall'ISMAR CNR (Correggiari et al., 2014).

Un Modello Digitale del Terreno (DTM) costituito da dati LIDAR acquisiti nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale, resi disponibili tramite il Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>), ed integrati con un recente rilievo topobatimetrico eseguito da Arpa Emilia-Romagna (2016), è stato utilizzato per confinare superiormente il modello stratigrafico del sottosuolo.

In Figura 2.5.1 viene mostrata la classificazione delle unità deposizionali del suolo superficiale desunta dalla Carta Geologica d'Italia sovrapposta al rilievo LIDAR, mentre in Figura 2.5.2 è presentata l'interpretazione tramite software RockWorks delle prove CPTU e dei sondaggi a carotaggio continuo,

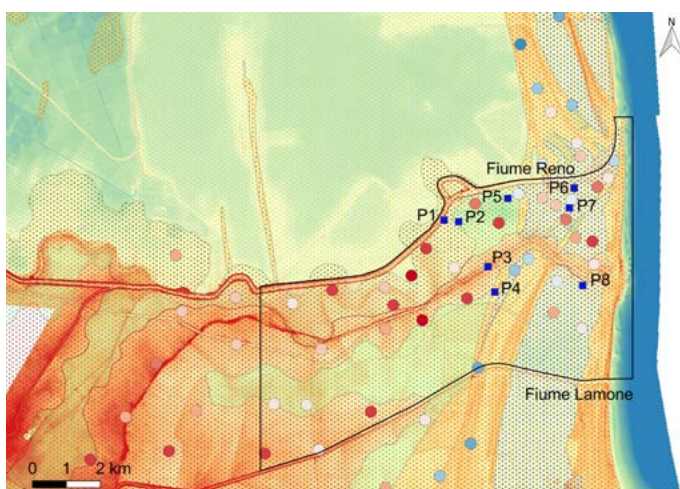


ristretta all'area di studio con risoluzione di 50 m. Risulta evidente l'importante acquifero sabbioso su cui insistono i suoli agrari dell'area. Le quote del tetto e del letto dell'acquifero sono poste a livelli crescenti a partire da Alfonsine fino alla linea di riva attuale. Il tetto superiore emerge in corrispondenza dei cordoni dunali storici ed attuali. Nelle aree interdunali l'acquifero è coperto da sedimenti limo-argillosi di ambiente deposizionale lagunare o fluviale. L'acquifero è: libero o freatico nelle zone dunali, certamente confinato ad Ovest della duna medievale ove la potenza del deposito argilloso sovrastante è significativa; ad Est della duna medievale il comportamento risulta semi-confinato

in relazione al livello della falda.

L'acquifero è limitato inferiormente dai depositi limo-argillosi del prodelta posti ad una profondità di circa 10 m nell'area, limite leggermente degradante verso Ovest.

La Figura 2.5.1 mostra anche la permeabilità orizzontale media degli strati soprastanti il prodelta, desunta dalle prove CPTU; è evidente come le maggiori permeabilità si abbiano lungo gli apparati dunosi ove le sabbie affiorano, mentre i valori minimi si raggiungano nelle depressioni, in particolare quelle interne dove si ritrovano depositi fini di maggiore spessore.

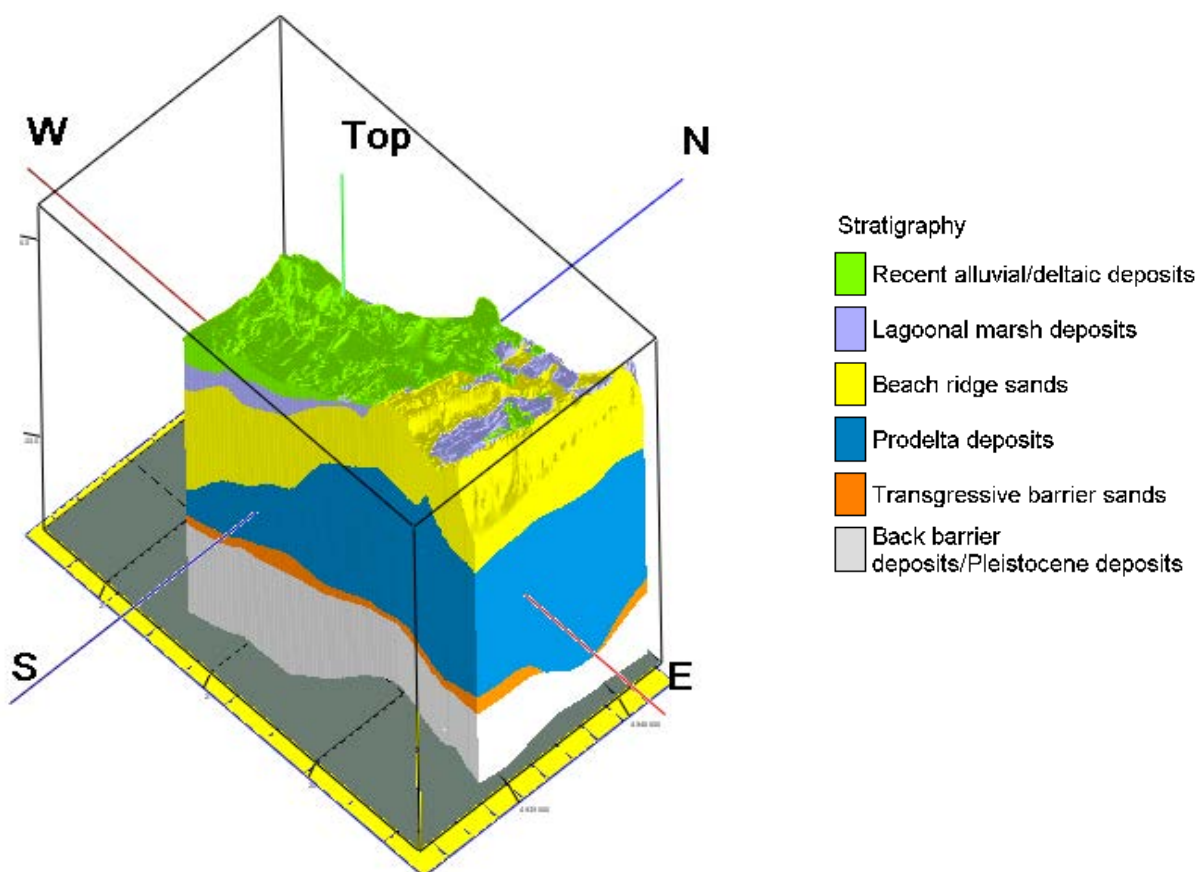


#### Legenda

- Piezometri Agrowetlands II
- Contorno del modello stratigrafico
- Conducibilità idraulica (m/s)
  - <10<sup>-7</sup>
  - >10<sup>-7</sup>
  - <10<sup>-6</sup>
  - >10<sup>-6</sup>
  - <10<sup>-5</sup>
  - >10<sup>-5</sup>
- Ambienti deposizionali e litologie
  - ▨ Argilla limosa - Deposito di palude salmastra e laguna di retrocordone
  - ▨ Sabbia - Deposito di cordone litorale
  - ▨ Sabbia limosa - Deposito di canale, argine e rotta fluviale
  - ▨ Argilla limosa - Deposito di piana inondabile in area interfluviale
  - ▨ Sabbia limosa - Deposito di canale distributore, argine e rotta
  - ▨ Argilla limosa con torba - Deposito di palude in area interdistributrice

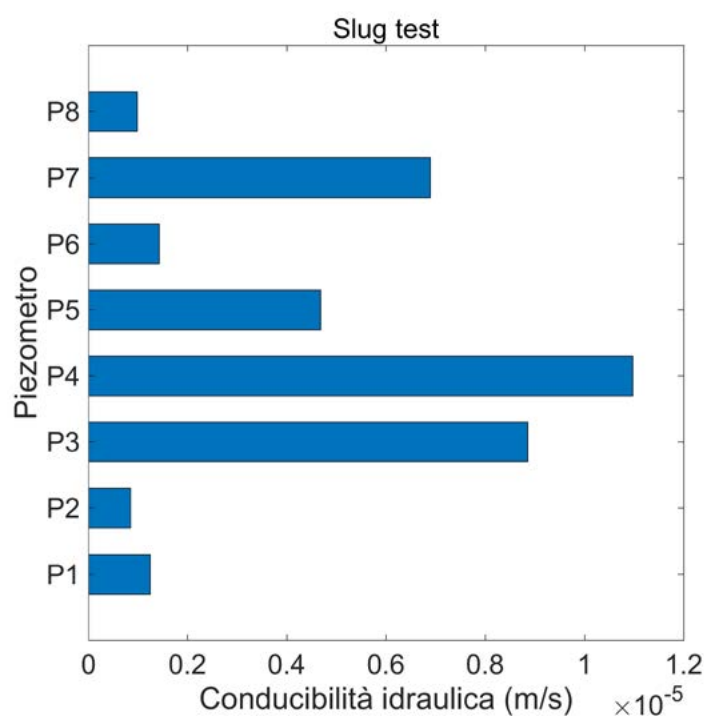
**Figura 2.5.1.** - Rilievo LIDAR dal Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale integrato con il rilievo topo-batimetrico eseguito da Arpa Emilia-Romagna nel 2012. Geologia di superficie dell'area di studio dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:10'000, derivata in formato vettoriale dal Catalogo dei Dati Geografici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (https://geo.regione.emilia-romagna.it/geocatalogo/). Stime della permeabilità degli strati superficiali desunte dalle prove CPTU. Da Lamberti et al. (2018).

**Figure 2.5.1.** - LIDAR survey from the Extraordinary Plan of Environmental Remote Sensing integrated with the topo-bathymetric survey performed by Arpa Emilia-Romagna in 2012. Surface geology of the study area from the Geological Map of Italy at a scale of 1:10'000, derived in vector format from the Catalog of Geographic Data of the Geological, Seismic and Soil Service of the Emilia-Romagna Romagna Region (https://geo.regione.emilia-romagna.it/geocatalogo/). Estimates of the permeability of the surface layers derived from CPTU tests. From Lamberti et al. (2018).



**Figura 2.5.2.** - Modello stratigrafico 3D della sequenza deposizionale olocenica nell'area di studio. Da Lamberti et al. (2018).

**Figure 2.5.2.** - 3D stratigraphic model of the Holocene depositional sequence in the study area. From Lamberti et al. (2018).



**Figura 2.5.3.** - Conducibilità idraulica stimata agli otto piezometri mediante slug test interpretati con il metodo di Bouwer-Rice. Da Lamberti et al. (2018).

**Figure 2.5.3.** - Hydraulic conductivity estimated at the eight piezometers using slug tests interpreted with the Bouwer-Rice method. From Lamberti et al. (2018).

Stime della permeabilità dell'acquifero nell'area di studio sono state ottenute anche da slug test condotti negli otto piezometri installati a fine Marzo 2017 nell'ambito del progetto. Le permeabilità desunte dagli slug test con il metodo di Bouwer-Rice (1976) sono indicate in Figura 2.5.3. Poiché la falda sabbiosa normalmente interseca la finestratura dei piezometri posta fra -1 e -3 m s.p.c., le stime indicano la permeabilità di questa. Fanno eccezione i piezometri P01 e P02 in cui la finestratura interessa solo la coltre limo-argillosa. La permeabilità stimata denota la permeabilità media nella zona della finestratura con qualche incertezza che deriva dalla imperfetta rispondenza dell'acquifero reale allo schema interpretativo di acquifero omogeneo ed isotropo.

Per quanto attiene la ingressione marina nella falda merita evidenziare come l'acqua salata risale lungo la foce del fiume Reno fino allo sbarramento di Volta Scirocco, posto in corrispondenza dell'ultimo antico meandro (risvolta) prima della foce a mare, alla foce del Canale Destra Reno fino allo sbarramento detto Ponte Chiavica, la cui tenuta contro la risalita del cuneo salino non è perfetta, e lungo la foce del fiume Lamone poco oltre il ponte della strada statale Romea. Ai fini degli effetti sulla falda è opportuno anche osservare che le zone umide attorno al Lamone a monte del detto ponte, Punta Alberete e Valle della Canna sono alimentate con acqua dolce del Lamone, mentre a nord del Reno sono presenti le Valli di Comacchio. Ne consegue che la demarcazione fra zone soggette a una forte e debole salinizzazione corre lungo l'allineamento Volta Scirocco ponte sul Lamone della Romea, con qualche penetrazione possibile dalle Valli di Comacchio verso Sud lungo antichi cordoni dunosi più permeabili.

L'ingressione del sale nell'area risulta particolarmente evidente ed attiva nel periodo invernale, quando i canali sono normalmente vuoti. Nei periodi secchi ed in assenza di irrigazione lo strato di acqua dolce

superficiale si assottiglia o scompare del tutto lasciando risalire l'acqua salata.

Questo risulta particolarmente evidente al piezometro P05 posto nello squadro 4 Bio-Marcabò dotato di un sistema di drenaggio sotterraneo. Questo campo è stato coltivato a:

- mais nella stagione 2017 (semina 13/04, raccolto 01/08),
- orzo nella stagione 2018, con mietitura a Giugno e campo lasciato incolto nell'estate,
- soia nel 2019 (25/05-30/09).

Gli interventi irrigui sono stati eseguiti con un pivot centrale distribuendo i seguenti volumi d'acqua:

- per il mais 94 mm nella stagione così suddivisi: 15 mm il 03/06/2017, 17 mm il 12/06/2017, 17 mm il 23/06/2017, 20 mm il 06/07/2017 e 25 mm il 15/07/2017;
- per la soia 35 mm nella stagione così suddivisi: 10 mm il 05/06/2019, 12 mm il 10/06/2019, 12 mm il 13/06/2019 e 13 mm il 19/06/2019.

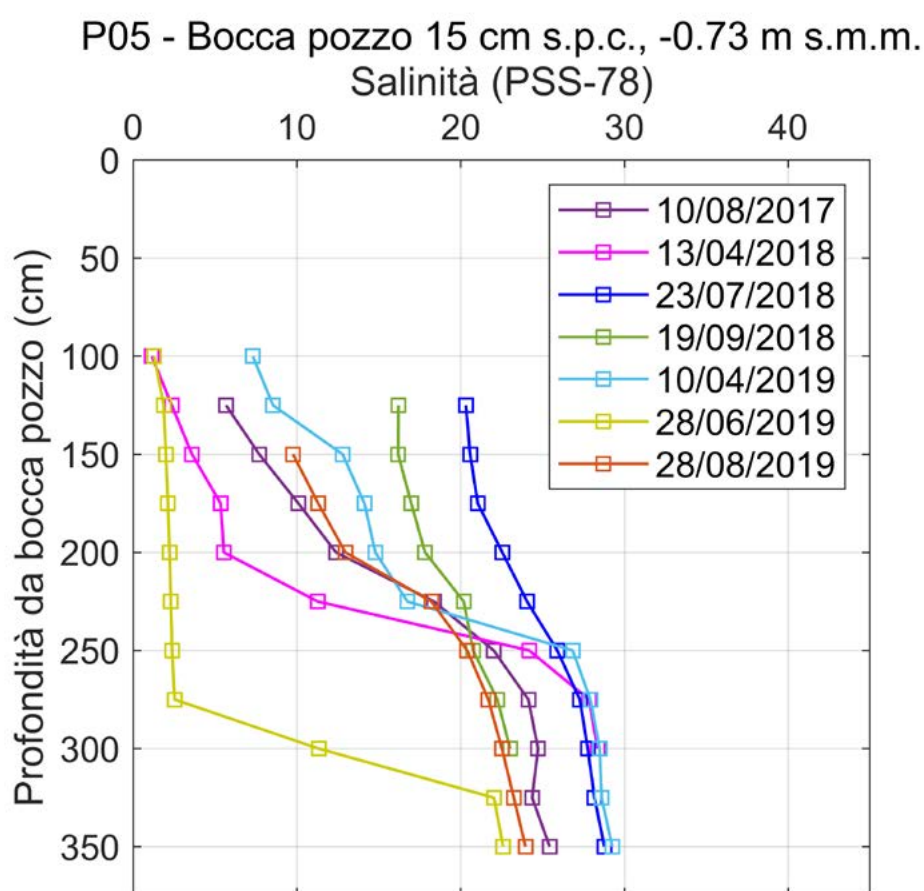
In Figura 2.5.4 viene mostrato l'andamento della salinità derivata dalle misure di conducibilità elettrica, temperatura e pressione secondo la Practical Salinity Scale (1978) (Unesco, 1983) per alcuni dei rilievi di stratificazione verticale eseguiti con il sensore CTD-10 (Decagon) nel suddetto piezometro durante il periodo di monitoraggio del progetto.

Nella falda è presente una evidente stratificazione che separa le acque dolci di origine pluviale o irrigua dalla sottostante acqua salata.

Il primo profilo del 10/08/2017 rappresenta la situazione al termine della stagione irrigua. Il successivo del 13/4/2018 rappresenta una tipica condizione primaverile con ricarica di acqua dolce dovuta alle precipitazioni invernali. Essendo la coltura praticata nell'anno 2018 non irrigua i successivi rilievi di luglio e settembre mostrano elevata salinità fino alla superficie. I rilievi del 2019 mostrano il 10/4/2019 un il profilo primaverile successivo ad un inverno secco, mentre le abbondanti piogge di Maggio 2019 e le successive

irrigazioni di Giugno hanno determinato una potenza dello strato superiore di acqua dolce di oltre 2 m con interfaccia di separazione acqua dolce/salata a circa 3,0 m da bocca pozzo. Successivamente, in assenza di apporti irrigui, lo spessore dello strato

di acqua dolce va progressivamente riducendosi e l'interfaccia di separazione risale verso il piano campagna, determinando valori di salinità un po' più elevati nello strato superficiale.



**Figura 2.5.4.** - Andamento della salinità al variare della profondità da bocca pozzo al piezometro P05 per alcuni rilievi eseguiti durante il periodo di monitoraggio del progetto.

**Figure 2.5.4.** - Vertical salinity pattern at piezometer P05 for some survey performed during the project monitoring period; the vertical axis shows depth below the well top.



## 2.6

A delineation and classification of the soils of the area and results of soil sample physico-chemical analysis is presented based on which the soil map of the area is upgraded.

### 2.6 - SUOLI: TIPI, DELINEAZIONE E SALINITÀ

Delineazioni pedologiche. Dalle indagini del Servizio suolo della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2018a), l'area è caratterizzata da suoli con moderata pedogenesi (Cambisols - FAO, 2014) spesso colpiti da idromorfia (stagnic, gleyic); vicino alla costa sui

sistemi di dune antiche e recenti ci sono terreni con un alto contenuto di sabbia (Arenosols - IUSS, 2014). Nella Tabella 2.6.1 sono riportati e confrontati il numero della delineazione pedologica (Regione Emilia-Romagna), la frequenza di suoli e la loro classificazione (Soil Taxonomy, 2014 e FAO, 2014). Sulla base delle conoscenze geologiche



**Figura 2.6.1.** - Delineazioni pedologiche RER presenti nell'area di studio.

**Figure 2.6.1.** - RER Pedological delineations in the project area.

deposizionali, morfologiche e pedologiche si è organizzato nell'autunno 2016 il primo campionamento dell'area di indagine che prevedeva la raccolta di 50 punti a quattro differenti profondità 0-10, 10-30, 30-60 e 60-90 cm per un totale di 200 campioni (Fig. 2.6.2).

Dalle analisi ottenute della campagna di campionamento e analisi si sono state corrette le delineazioni pedologiche della RER, elaborando una mappa di dettaglio (Fig. 2.6.3), che comprendesse anche la presenza di salinità.

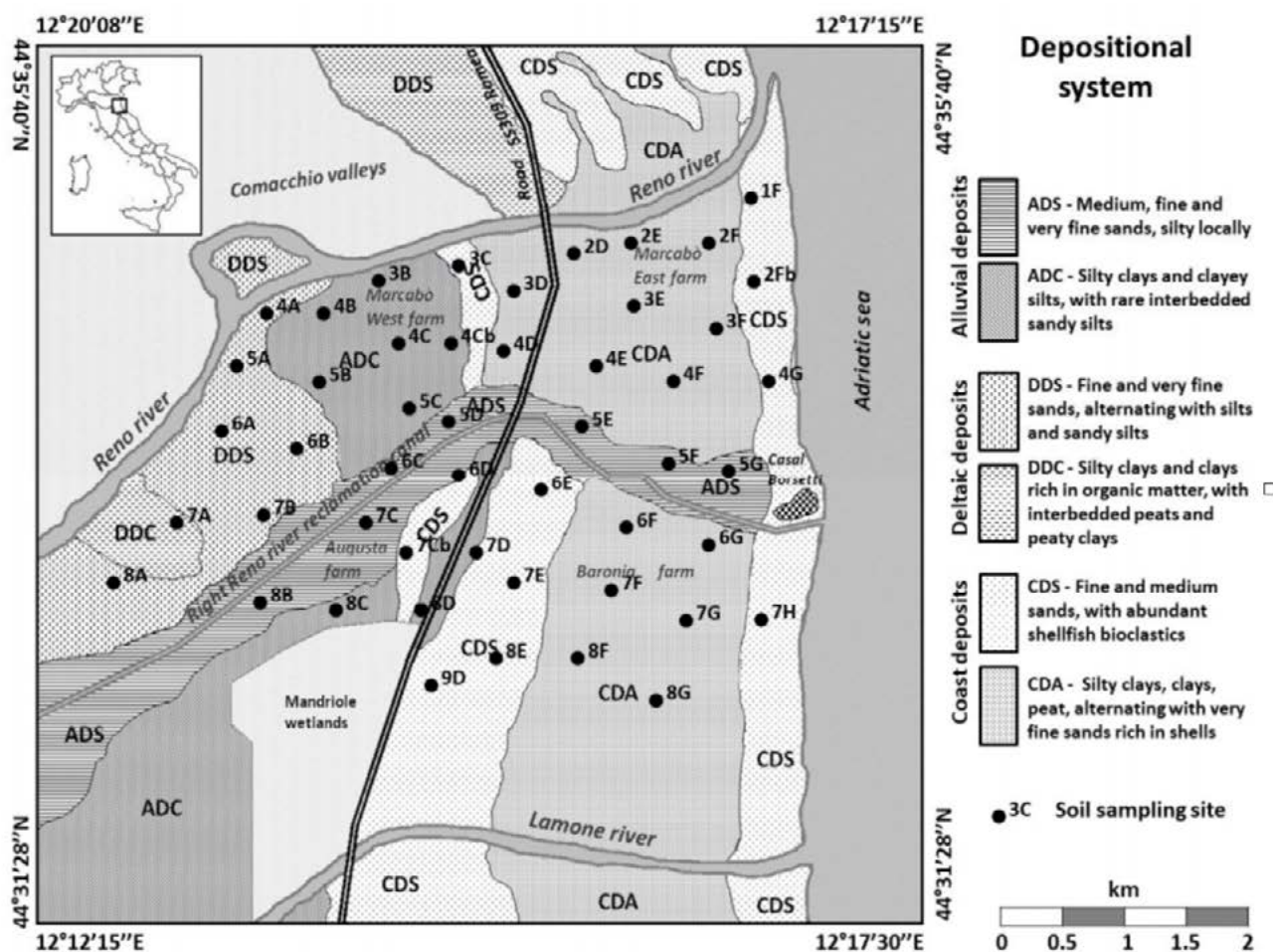


Figura 2.6.2. - Posizionamento dei 50 punti di campionamento del suolo sulla mappa del sistema deposizionale

Figure 2.6.2. - Positions of the 50 soil sampling points on the depository system map

Suoli dell'area di studio. La maggior parte dell'area comprende Arenosols e Cambisols e per una piccola porzione Fluvisols e Gleysols (FAO, 2014). All'interno dei gruppi di riferimento del suolo sono stati rilevati diversi qualificatori: Infatti, il qualificatore del prefisso era principalmente correlato alla presenza di condizioni redossimorfiche (gleyiche), ristagno idrico (stagnico), presenza di sale (salico), alternanze di materiali alluvionali (fluviale), vertisolizzazione (verticali) e basi ad alta saturazione (eutrico). Sugli antichi depositi costieri

sabbiosi paralleli alla linea costiera, coperti principalmente da zone umide e boschi, si sono sviluppati Eutric Arenosols (euAR). Nelle zone intradunali, morfologicamente basse, Stagnic Fluvisols (Siltic) (stFL) si sono sviluppati sui depositi sedimentari limosi mentre i Subaquatic Stagnic Gleysols (sq / stGL) si trovavano nella terra di ri-naturalizzazione (ad esempio zone umide) con falda poco profonda. I cambisoli erano maggiormente presenti e sono quelli maggiormente usati dall'agricoltura. Tra questi, Fluvic Cambisols (flCM) si sono sviluppati su ADS con deposizione locale di limo

Delineazione numero	Delineazione denominazione	Frequenza %	Soil Taxonomy (2014)	FAO (2014)B
6702	GLS2 Galisano argilloso limosi	80	VERTIC ENDOAQUEPTS fine, mixed, active, calcareous, mesic	VERTIC ENDOGLEYIC (calcaric)
	LCV2 La Cavallina franco argilloso limosi	15	AQUIC USTIFLUVENTS fine silty, mixed, active, calcareous, mesic	STAGNIC FLUVISOLS (Calcaric, Siltic)
6706	VIL1 Villalta franco sabbiosi molto fini	40	UDIFLUVENTIC HAPLUSTEPTS coarse loamy mixed, superactive, mesic	FLUVIC CAMBISOLS (Calcaric)
	SMB1 Sant'Omobono franco limosi	25	UDIFLUVENTIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC CAMBISOLS (Calcaric, Siltic)
	VIL2 Villalta franchi	20	UDIFLUVENTIC HAPLUSTEPTS coarse loamy mixed, superactive, mesic	FLUVIC CAMBISOLS (Calcaric)
7579	MCB1 Marcabò franco limosi	45	AQUIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC ENDOGLEYIC CAMBISOLS (Calcaric, siltic)
	SVO1 Savio franco limosi	35	AQUIC HAPLUSTEPTS loamy over sandy, mixed, active, mesic	STAGNIC CAMBISOLS (Calcaric)
	GLS3 Galisano argilloso limosi	15	VERTIC ENDOAQUEPTS fine, mixed, active, calcareous, mesic	VERTIC ENDOGLEYIC (calcaric)
7630	CER3 Cerba sabbioso fini con orizzonti organici sup.	70	AQUIC USTIPSAMMENTS mixed, mesic	ENDOGLEYIC ARENOSOLS (Calcaric)
	PIR1 Pirottolo sabbioso fini franchi	12	TYPIC PSAMMAQUENTS mixed, mesic	ENDOGLEYIC ARENOSOLS (Calcaric)
8195	MCB1 Marcabò franco limosi	45	AQUIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC ENDOGLEYIC CAMBISOLS (Calcaric, siltic)
	SVO1 Savio franco limosi	35	AQUIC HAPLUSTEPTS loamy over sandy, mixed, active, mesic	STAGNIC CAMBISOLS (Calcaric)
	GLS3 Galisano argilloso limosi	15	VERTIC ENDOAQUEPTS fine, mixed, active, calcareous, mesic	VERTIC ENDOGLEYIC (calcaric)
8196	SVO1 Savio franco limosi	40	AQUIC HAPLUSTEPTS loamy over sandy, mixed, active, mesic	STAGNIC CAMBISOLS (Calcaric)
	CER1 Cerba sabbioso fini	30	AQUIC USTIPSAMMENTS mixed, mesic	ENDOGLEYIC ARENOSOLS (Calcaric)
	MCB1 Marcabò franco limosi	20	AQUIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC ENDOGLEYIC CAMBISOLS (Calcaric, siltic)
8525	CER3 Cerba sabbioso fini con orizzonti organici sup.	35	AQUIC USTIPSAMMENTS mixed, mesic	ENDOGLEYIC ARENOSOLS (Calcaric)
	SAV3 San Vitale sabbioso fini decapitati	25	TYPIC USTIPSAMMENTS mixed, mesic	HAPLIC ARENOSOLS (Calcaric)
	CER1 Cerba sabbioso fini	15	AQUIC USTIPSAMMENTS mixed, mesic	ENDOGLEYIC ARENOSOLS (Calcaric)
10744	PRD1 Pradoni franco argilloso limosi	65	AQUIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	GLEIYIC CAMBISOLS (Calcaric, siltic)
	PRD3 Pradoni franco limosi	15		
	SMB2 Sant'Omobono franco argilloso limosi	15	UDIFLUVENTIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC CAMBISOLS (Calcaric, Siltic)
10745	GLS2 Galisano argilloso limosi	65	VERTIC ENDOAQUEPTS fine, mixed, active, calcareous, mesic	VERTIC ENDOGLEYIC (calcaric)
	GLS1 Galisano franco argilloso limosi	35		
10746	GLS3 Galisano argilloso limosi	50	VERTIC ENDOAQUEPTS fine, mixed, active, calcareous, mesic	VERTIC ENDOGLEYIC (calcaric)
	MCB1 Marcabò franco limosi	30	AQUIC HAPLUSTEPTS fine silty, mixed, superactive, mesic	FLUVIC ENDOGLEYIC CAMBISOLS (Calcaric, siltic)
	SVO2 Savio franco argilloso limosi	10	AQUIC HAPLUSTEPTS Clayey over sandy, mixed, active, mesic	STAGNIC CAMBISOLS (Calcaric)

**Figura 2.6.1. - Delineazioni pedologiche della Regione Emilia-Romagna. Il numero della Delineazione, la sua denominazione, e la classificazione dei suoli sono secondo la Soil Taxonomy (2014) e FAO (2014)**

**Figure 2.6.1. - Pedological delineations in the Emilia-Romagna region. Delineation number, Delineation name and soil classification are according to Soil Taxonomy (2014) and FAO (2014).**



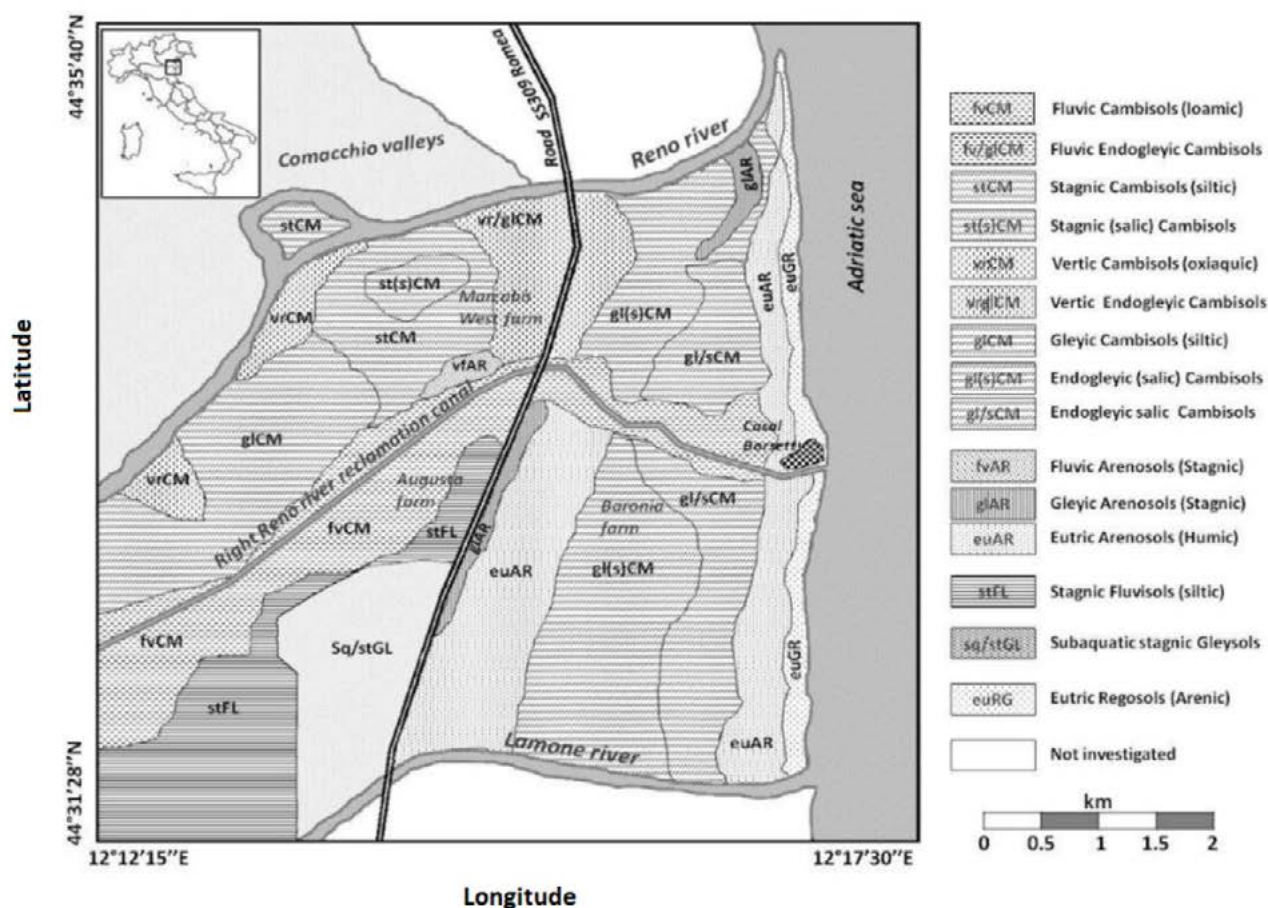


Figura 2.6.3. - Mappa dei suoli elaborata dalla campagna di campionamento (da Vittori Antisari et al., 2020 Minerals).

Figure 2.6.3. - Soil map realized with the data of the sampling campaign (image from Vittori Antisari et al., 2020, Minerals)

e si diffuse lungo il canale del fiume Reno a destra (CDR), costruito sull'antico letto del fiume Lamone, che fu deviato durante i lavori di bonifica. Stagnic Cambisols (stCM) e Stagnic (Salic) Cambisols (st (s) CM) sono per lo più situati nella parte nord-occidentale dell'area, su argille limose e depositi alluvionali argillosi di limo (ADC). Sia il Vertic che il Gleyic Cambisols (rispettivamente vrCM e glCM) sono stati riconosciuti vicino al letto del fiume Reno su depositi deltaici argillosi limosi e argillosi ricchi di torba organica (rispettivamente DDS e DDC). Infine, Endogleyic Cambisols (glCM e gl (s) CM, rispettivamente), caratterizzati da una diversa concentrazione di sale e, di conseguenza, con proprietà saline, si sono sviluppati tra le due dune sabbiose su depositi costieri, formati da argilla

limosa e argilla e strati di torba che si alternano a sabbia finissima.

Le caratteristiche fisicochimiche dei suoli oggetto di indagine pedologica si differenziano a seconda dei suoli e della profondità degli strati (Tabella 2.6.2).

I valori della Conducibilità elettrica in pasta satura (ECe) sono alti sia durante il campionamento invernale (ECew) sia quello estivo (ECes), indicando la presenza di sale (salic) nei suoli. E' possibile individuare come i suoli con maggiore salinità si trovino nelle aree interdunali, parallele alla linea di costa e in una zona di depressione, all'interno dell'azienda Baronia.

Superficial layers (0 – 30 cm soil depth)											
Soil classification		pH	CaCO <sub>3</sub>	Sand	Silt	Clay	TOC	FC	BD	EC <sub>ew</sub>	EC <sub>es</sub>
				-----%-----				g/cm <sup>3</sup>		----dS/m----	
euAR	mean	7.5	11.4	90	6	4	0.3	18	1.5	4.7	4.6
	SE	0.1	1.8	2.9	1.8	1.6	0.3	4.0	0.1	0.4	0.2
fvCM	mean	7.8	16.9	33	49	18	0.8	23	1.5	3.4	4.7
	SE	0.1	4.2	2.5	2.7	0.6	0.2	1.9	0.1	0.1	0.3
glCM	mean	7.8	19.6	20	59	21	0.8	27	1.5	5.0	3.7
	SE	0.1	1	4.4	2.9	1.8	0.1	2.4	0	0.4	0.3
gl(s)CM	mean	7.8	19.3	15	51	34	0.7	26	1.5	5.0	7.8
	SE	0.1	1	3.2	4.7	4.7	0.1	2.0	0.1	0.2	0.3
stCM	mean	7.8	20.8	7	49	44	1.1	29	1.9	5.3	6.6
	SE	0.1	1.8	0.8	4.2	3.7	0.2	1.7	0	0.4	0
vr/glCM	mean	7.9	17.1	14	48	38	1.1	23	1.7	3.7	5.0
	SE	0.0	1.1	2.7	2.2	1.9	0.1	1.6	0.1	0.2	0.1
Depth layers (30 – 90 cm soil depth)											
Soil classification		pH	CaCO <sub>3</sub>	Sand	Silt	Clay	TOC	FC	BD	EC <sub>ew</sub>	EC <sub>es</sub>
				-----%-----				g/cm <sup>3</sup>		----dS/m----	
euAR	mean	7.5	11.4	90	6	4	0.3	18	1.5	4.7	4.1
	SE	0.1	1.8	2.9	1.8	1.6	0.3	4	0.1	0.4	0.2
fvCM	mean	7.8	16.9	33	49	18	0.8	23	1.5	4.7	4.7
	SE	0.1	4.2	2.5	2.7	0.6	0.2	1.9	0.1	0.1	0.3
glCM	mean	7.8	19.6	21	59	20	0.8	27	1.9	4.7	3.7
	SE	0.0	1	4.4	2.9	1.8	0.1	2.4	0	0.4	0.3
gl(s)CM	mean	7.8	19.3	15	51	34	0.7	26	1.5	5.9	7.8
	SE	0.0	1	3.2	4.7	4.7	0.1	2	0.1	0.2	0.3
stCM	mean	7.8	20.8	7	53	40	1.1	29	1.6	5.0	6.6
	SE	0.1	1.8	0.8	4.2	3.7	0.2	1.7	0	0.4	0
vr/glCM	mean	7.9	16.9	19	45	36	1.1	23	1.7	5.3	5.0
	SE	0.1	1.1	2.7	2.2	1.9	0.1	1.6	0.1	0.2	0.1
euAR = Eutric Arenosols; fvCM = Fluvis Cambisols; glCM = Gleyic Cambisols; gl(s)CM = Endogleyic Cambisols; stCM = Stagnic Cambisols; vr/glCM = Vertic and Gleyic Cambisols.											

**Tabella 2.6.2.** - Caratteristiche fisicochimiche dei suoli nell'area del progetto. Strati superficiali (media dei dati 0-10 e 10-30 cm) e strati profondi (media 30-60 e 60-90).

**Table 2.6.2.** - Soil physiochemical traits in the project area. Superficial layers report average values at 0-10 and 10-30 cm depths and Depth layers report average values at 30-60 and 60-90 cm depth.

## 2.7 - LAND USE: CROPS, SEMINATURAL, NATURAL AND PROTECTED AREAS.

Despite the threat posed by salinization the project area is mostly used for extensive agriculture. The agronomic management consists in keeping the land drained and preventing saline groundwater to reach the upper soil layers. For this reason, the crops are surrounded by draining ditches and in some cases draining pipes are buried under the crops to drain saline water. A large part of the land is cultivated for fodder, including alfalfa and mixed herbage. Other crops are autumn-winter cereals, spring cereals and industrial sugar beet crops. No fruit groves occur in the area. Precision agriculture is common and optimizes the use of technical machinery with the agronomic management. Irrigation is limited, and permanent irrigation facilities occur only associated with spring cereals cultivation. Compared to inland crops, agriculture in the coastal part of the area has lower yields and a more limited choice of rotational crops (Fig. 2.7.1).

This land hosts a large number of SCIs and SPAs that derive from relict coastal habitats that escaped the reclamation activities. These are today important nodes of the Nature 2000 network (Regione Emilia Romagna, 2012). The SCI/SPA Punte Alberete and Valle Mandriole (IT4070001) is a freshwater wetland that includes the flooded forest of Punte Alberete in the south and Valle Mandriole (or Valle della Canna) adjacent to the project area in the west. It is a well known birdwatching station (Fig. 2.7.2). Unfortunately, the freshwater habitats in this wetland have been declining for the last 20 years because of water eutrophication and introduction of alien species. The SCI/SPA Bardello (IT4070002) is a wet meadow of about 100 hectares furrowed by ancient dunes and interdunal wetlands (Fig. 2.7.3). Because of a variety of microclimatic conditions associated with the xeric conditions of the dunes, the wetlands, and the emergence of saline groundwater in some spots in the area, this site hosts a large biodiversity associated with 17 habitats protected by the Habitats Directive. The meadow is mown periodically to conserve habitats and

biodiversity. East from Bardello is the SCI/SPA Pineta di San Vitale e Bassa del Pirottolo (IT4070003) (Fig. 2.7.4). Like Bardello, the forest alternates hygrophilous poplars and ashes forest in interdunal wetlands with the xerophilous Mediterranean forest of evergreen oaks and pines on the dune ridges. The pines were planted in the middleage (Fig. 2.7.5).

The SCI/SPA Pialasse Baiona, Risega e Pontazzo (IT4070004) is a shallow brackish lagoon south of the project area, connected to the sea (Fig. 2.7.6). In the 1990s the southernmost crops in the area were set aside and subsequently included in this protected SCI for the evolution of brackish communities of European conservation priority. The lagoon is the habitat of two very rare plants: *Salicornia venetae* and *Limonium bellidifolium* (Fig. 2.7.7).

The hunting wetlands. In addition to SCI and SPAs the project area also includes artificial wetlands created among the crops for hunting purposes (Fig. 2.7.8). These freshwater wetlands provide important ecosystem services to the agricultural landscape. However, the lack of water during the summer when hunting is forbidden, limits the buffer function that these wetlands could have against groundwater salinization, as well as their water cleaning and irrigation storage potential (Fig. 2.7.9).

## 2.7 - USO DEL SUOLO: ZONE AGRICOLE, AREE SEMINATURALI, NATURALI E PROTETTE

L'agricoltura e le colture. L'area interessata dallo studio Agrowetlands II è una zona molto interessante dal punto di vista economico, sociale ed ambientale, in quanto coesistono aree con una destinazione d'uso molto differente: aree boschive, insediamenti abitativi, zone umide e zone ad uso agricolo. Quest'ultima in particolare riveste, nell'area oggetto di studio che si estende in direzione N-S dal canale destra Reno al fiume Lamone, e in direzione E-O dalla costa fino a 2-3 km verso l'interno, l'occupazione prevalente nonostante

le limitazioni imputabili all'elevata salinità dei terreni. L'area si colloca nella fascia costiera settentrionale ai margini este della Pianura Padana e si estende per circa 590 ettari; presenta un assetto idrografico complesso e completamente controllato dall'uomo, questo a causa delle inondazioni facilitate dalla topografia che si eleva di poco sul livello del mare. Un ruolo importante è rivestito dalle pinete costiere, la presenza delle quali garantisce una difesa delle aree agricole più interne dall'azione dello spray marino. Le colture praticate sono totalmente di tipo estensivo; sia per la difficoltà della gestione del terreno, sia per le scelte aziendali, non si riscontra alcun tipo di coltivazione arborea specializzata (frutteti) (Fig. 2.71).



**Figura 2.71.** - Veduta aerea dell'area agricola in cui è stato realizzato il progetto Life Agrowetlands II. (Foto Kepler Video)

**Figure 2.71** - Aerial view of the agricultural area where the Life Agrowetlands II project was carried out. (Photo Kepler Video)

La gestione agronomica delle superfici prevede, per tutti gli appezzamenti ricadenti nell'area, interventi di allontanamento delle acque in eccesso, con il mantenimento ottimale del franco di coltivazione in contrasto all'innalzamento del cuneo salino. Si riscontra

infatti, in tutta l'area di studio, la presenza di fossi e scoline, nella maggior parte degli appezzamenti e, limitatamente ad alcune zone, il ricorso ad interventi di miglioramento fondiario quali drenaggio sotterraneo tubato.

Buona parte dei terreni è coltivata con colture foraggere

che comprendono erbe mediche in purezza ed erbai misti; la restante parte è coltivata con cereali autunno vernini, cereali a semina primaverile e Barbabietola da zucchero destinata alla produzione industriale. La gestione dei terreni è di tipo convenzionale ricorrendo, in alcuni appezzamenti, a tecnologie di agricoltura di precisione per una miglior gestione dei mezzi tecnici e per una ottimizzazione delle operazioni colturali.

Il ricorso all'irrigazione è limitato, per tale motivo la vocazione della zona predilige coltivazioni con ridotte esigenze in termini di consumo idrico; si riscontra la presenza di un impianto fisso solo nel terreno coltivato con cereali a semina primaverile.

Di notevole interesse, soprattutto nella zona nei pressi del fiume Lamone, è la tendenza alla conversione dei terreni agricoli in aree di compensazione ecologica. Come probabile ricaduta positiva dei contributi previsti dal PSR la zona è caratterizzata dalla presenza di siepi, boschetti, fasce alberate e maceri/stagni che hanno occupato aree seminabili con lo scopo di valorizzare il contributo ambientale dell'agricoltura.

In linea di massima, in confronto ai territori localizzati più distante dalla fascia costiera, la zona è caratterizzata da minore produttività ed è limitata, inoltre, la scelta delle colture inseribili in rotazione.

Aree seminaturali, aree naturali e aree protette. Il territorio, profondamente modificato dalle opere di bonifica e dall'agricoltura moderna, ospita un grande numero di aree seminaturali relittuali di sistemi costieri e planiziari pre-esistenti sfuggiti alla bonifica. Tali ambienti sono oggi SIC (Siti di interesse comunitario) e ZPS (zone di protezione speciale per gli uccelli) e costituiscono nodi della rete europea di Natura 2000 (Regione Emilia Romagna, 2012).

**Punte Alberete e Valle Mandriole.** Il SIC/ZPS "Punte Alberete e Valle Mandriole" IT4070001 è collocato a circa 3 km dalla costa Adriatica lungo il fiume Lamone e comprende quanto resta della cassa di colmata del fiume dopo la bonifica avvenuta tra gli anni '50 e '70. La zona umida di acqua dolce è divisa in due dal corso del fiume Lamone: la parte meridionale, Punte Alberete, è un bosco

igrofilo allagato, mentre la parte settentrionale, Valle Mandriole (o Valle della Canna) in prossimità dell'area del progetto, è una valle aperta di circa 240 ha dominata da canneti e vegetazione elofitica. Valle della canna è una nota stazione di birdwatching, ed è uno dei pochi corpi di acqua dolce nell'ambiente salmastro e salino nell'area del progetto. Ha pertanto un'importante funzione tampone alla salinizzazione, oltre che di rifugio per la biodiversità legata all'acqua dolce (Fig. 1.7.2). Gli studi di Merloni e Piccoli dal 2001 al 2007 evidenziano un progressivo declino della vegetazione di Valle della Canna, in particolare di piante acquatiche sommerse e dei lamineti un tempo molto comuni in questa valle. La scomparsa di vegetazione acquatica ha avuto un effetto a cascata sugli uccelli che si nutrono di piante acquatiche, e sulle comunità di insetti e molluschi ad esse associati. La scomparsa della Moretta Tabaccata, per esempio, è stata ricondotta alla scomparsa di vegetazione acquatica sommersa. Le ragioni del declino sono da ricercarsi nell'inquinamento e progressiva eutrofizzazione dell'acqua, nell'ingresso di specie invasive (in particolare nutria e gambero rosso) e nell'intrusione marina nella falda, affiorante in alcuni punti della valle (Regione Emilia-Romagna, 2018). Gli studi sulla comunità di invertebrati che vivono nel sedimento delle aree umide dell'area del progetto, comprese quelle di Valle della Canna, intrapresi da Agrowetlands II, evidenziano la presenza di organismi generalisti adattati a vivere in condizioni di inquinamento e anossia, e confermano il declino degli ambienti acquatici d'acqua dolce e la presenza di habitat acquatici eutrofizzati e disturbati (Lambertini et al. 2020). Nel corso del progetto è stata inoltre osservata l'espansione della pianta alloctona *Ludwigia peploides* sulla superficie dell'acqua della valle, che contribuisce a episodi di ipo- e anossia, e accumulo di solfuri (Dandelot et al., 2005).

**Bardello.** Il SIC/ZPS IT4070002 Bardello è una prateria umida di un centinaio di ettari solcata da dossi sabbiosi, residui degli antichi cordoni dunosi litoranei, e avvallamenti interdunali (Fig. 1.7.3). L'affioramento temporaneo della falda salata in alcune bassure, l'allagamento costante di altre, e diversi tipi di suolo, creano ambienti molto diversi tra loro che ospitano un'alta biodiversità: bassure





**Figura 2.7.2.** - *Vista di Valle della Canna dalla torre di avvistamento sull'argine sud della valle. (Foto Kepler Video).*

**Figure 2.7.2** - *View of Valle della Canna from the birdwatching tower south of the wetland. (Photo Kepler Video).*

a ristagno di acque oligotrofiche e vene d'acqua più profonde con vegetazione acquatica e di canneto, bassure con acqua salmastra e vegetazione alofila, dossi sabbiosi con prati xerici, e nuclei arbustivi e arborei frammentati. Il SIC include 17 habitats di interesse comunitario, di cui 5 prioritari, legati alla presenza di dune vegetate, paludi

salmastre e pozze temporanee.

Nonostante l'elevata diversità in habitats, e la maggiore biodiversità rispetto ai siti naturali e seminaturali indagati da Agrowetlands II, la comunità di invertebrati nei sedimenti del Bardello non si differenzia da quella degli altri siti maggiormente antropizzati, e presenta taxa



**Figura 2.7.3.** - *Il prato del Bardello. (Foto Kepler Video).*

**Figure 2.7.3** - *Bardello wet meadow (Photo Kepler Video).*

tipici di comunità disturbate e sottoposte a stress di diversa natura (Lambertini et al. 2020). Questo è probabilmente dovuto al disturbo legato agli interventi periodici di sfalcio della prateria e del canneto, e agli allagamenti in alcune parti del SIC, necessari per la conservazione del prato umido e della sua biodiversità, nonché alla qualità dell'acqua.



**Figura 2.7.4.** - Vista aerea del prato del Bardello, della Pineta di San Vitale, dei campi dell'area del progetto e del mare sullo sfondo; in alto a destra la Pialassa della Baiona. (Foto Kepler Video).

**Figure 2.7.4** - Aerial view of Bardello wet meadow, Pineta di San Vitale forest, the meadows in the project area and the sea in the background; in the upper right corner the "Pialassa della Baiona". (Photo Kepler Video).

costiere tra il X e XV secolo (Lazzari et al. 2010). Come il prato del Bardello, la pineta si sviluppa su bassure umide e sulle zone elevate sabbiose degli antichi cordoni dunosi, e alterna il bosco igrofilo di pioppi e frassini al bosco xerofilo ricco di specie mediterranee come il leccio e la fillirea sui cordoni sabbiosi più elevati (Fig. 2.7.5). Il pino domestico (*Pinus pinea*) e' stato impiantato artificialmente in epoca medioevale.

**Pialassa della Baiona.** Il SIC/ZPS IT4070004 Pialasse Baiona, Risega e Pontazzo è una laguna salmastra poco profonda di circa 1600 ha a sud dell'area del progetto, a contatto con il mare tramite canali (Fig. 2.7.6).

Il sito presenta gradienti di salinità e umidità che

**Pineta di San Vitale.** A est del prato del Bardello si trova la Pineta della Bedelassona, che fa parte della Pineta San Vitale (SIC/ZPS IT4070003 Pineta di San Vitale e Bassa del Pirrottolo) (Fig. 2.7.4). La Pineta di San Vitale e' il nucleo più settentrionale e più vasto delle pinete storiche di Ravenna impiantate su dune

favoriscono lo sviluppo di habitat molto diversificati fra loro. Il SIC include infatti 10 habitat di interesse comunitario di cui 3 prioritari a livello europeo tipici di ambienti litoranei e lagunari, con dune consolidate e corpi d'acqua salmastra. La laguna è inoltre l'habitat di specie alofile molto rare tra cui *Salicornia venetae*, di interesse comunitario prioritario, e *Limonium bellidifolium* con stato di conservazione "vulnerabile" secondo il Libro rosso delle piante d'Italia (Conti et al., 1992) (Fig. 2.7.7). Negli anni '90, sono stati annessi al SIC circa 40 ettari di prati umidi e stagni a nord del fiume Lamone derivanti da seminativi ritirati dalla produzione grazie all'applicazione di misure agroambientali comunitarie. Oggi tali coltivi abbandonati sono



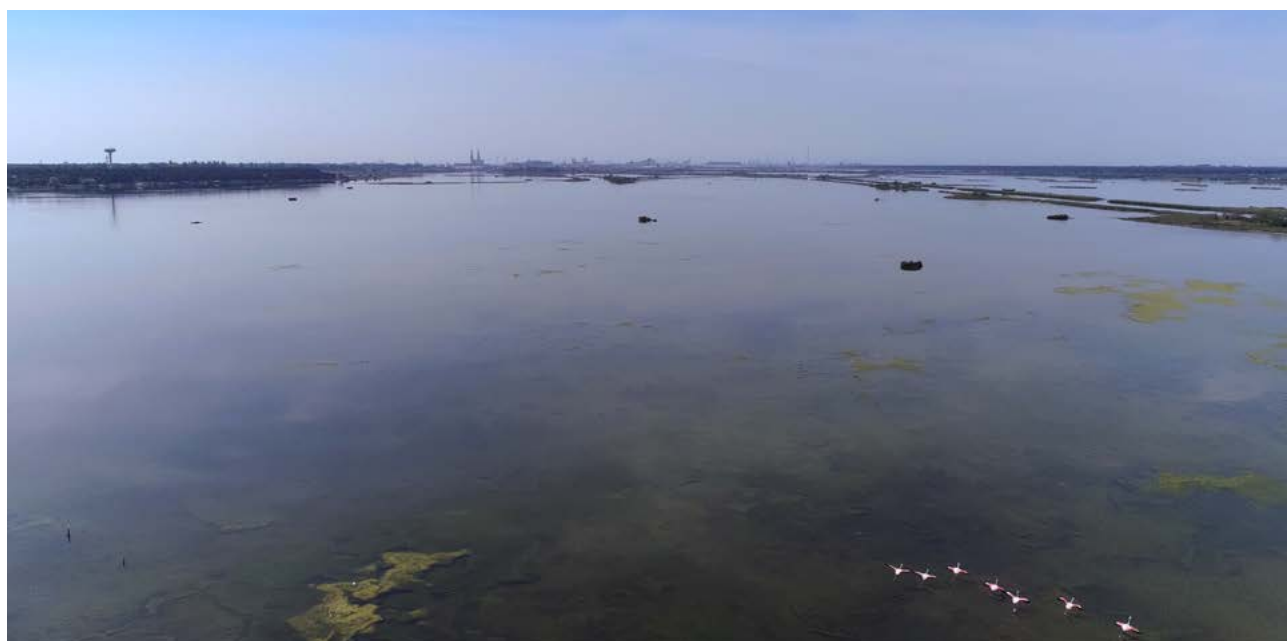
ricchi di specie alofile rare di elevato valore naturalistico. Un fattore di minaccia potrebbe essere la presenza della specie invasiva *Aster squamatus* (Sajna et al. 2014) osservata nell'area del progetto

e particolarmente abbondante in questi coltivi precedentemente soggetti ad intenso disturbo e ora in via di successione ecologica.



**Figura 2.7.5.** - *Pineta di San Vitale. Lecci accanto ai pini sui cordoni sabbiosi elevati. (Foto Kepler Video).*

**Figure 2.7.5** - *San Vitale pine forest. Evergreen oaks grow next to pines on the old emerging dunes. (Photo Kepler Video).*



**Figura 2.7.6.** - *La Pialassa della Baiona. (Foto Kepler Video).*

**Figure 2.7.6** - *Pialassa della Baiona brackish lagoon. (Photo Kepler Video).*



**Figura 2.7.7.** - Una vista della Pialassa della Baiona. In primo piano *Salicornia veneta* e in lontananza *Limonium bellidifolium* con fiori rosa. (Foto Carla Lambertini).

**Figure 2.7.7** - A view of Pialassa della Baiona. *Salicornia veneta* in the foreground and *Limonium bellidifolium* with pink flowers in the background. (Photo Carla Lambertini).

I “chiari” da caccia. Oltre alle aree seminaturali dei SIC e ZPS di riconosciuto valore conservazionistico e sotto il regime di tutela del Parco Regionale del Delta del Po, l’area del progetto ospita anche aree seminaturali di moderata estensione e meno note dal punto di vista naturalistico. Si tratta dei “chiari” da caccia, ossia di aree umide artificiali create tra i campi e opportunamente nascoste tra macchie di vegetazione per attirare la fauna selvatica. L’acqua dei chiari è acqua dolce che viene opportunamente portata a queste aree umide all’inizio della stagione della caccia e mantenuta per tutta la stagione venatoria (Fig. 2.7.8). L’acqua inizia a scarseggiare al termine della stagione venatoria e le aree umide progressivamente si prosciugano nei mesi più caldi (Fig. 2.7.9). Nonostante il lungo periodo di siccità estiva si sono insediate comunità vegetali elofitiche ed occasionalmente nei periodi allagati si possono trovare specie acquatiche che sono oggi rare nella vicina Valle della Canna e in tutta la regione come il giunco fiorito (*Butomus umbellatus*) e la piantaggine acquatica (*Alisma plantago-aquatica*), oltre che a idrofite sommerse, come il ranuncolo peltato (*Ranunculus peltatus*). Tuttavia, la mancanza di acqua durante l’estate limita i servizi ecosistemici

che queste aree umide possono fornire all’area agricola minacciata di salinizzazione. La presenza di specchi d’acqua dolce superficiale contribuisce infatti ad alimentare la falda freatica con acqua dolce, e a creare zone tampone in profondità nel terreno che possono contrastare la risalita di acqua salata dalla falda e proteggere i suoli dall’accumulo di sale. Le aree umide superficiali sono inoltre sistemi naturali di depurazione e serbatoi di acqua dolce che possono essere utilizzati per l’irrigazione o per diluire acque di irrigazione di scarsa qualità. In conclusione, i sette chiari che sono presenti nell’area del progetto sono una risorsa preziosa in questa area minacciata di salinizzazione, da valorizzare sia dal punto di vista naturalistico, che agronomico. La gestione con Smart Agrowetlands é durata due anni e si é applicata ad un solo campo per anno, pur di dimensioni ragguardevoli. Le variazioni indotte sul regime di irrigazione di questi campi sono state molto contenute. Gli effetti sull’ambiente naturale sono stati quindi impercettibili e certamente indistinguibili dagli effetti delle condizioni agrometeorologiche diverse specifiche di ogni anno. Pertanto questa descrizione si applica anche allo stato dell’area alla fine del progetto.





**Figura 2.7.8.** - *Chiaro in Marcabò nella stagione della caccia. (Foto Kepler Video).*

**Figure 2.7.8** - *Hunting wetland in Marcabò during the hunting season. (Photo Kepler Video).*



**Figura 2.7.9.** - *Chiaro a Marcabò durante la stagione estiva (stesso chiaro come in Fig. 1.7.8). (Foto Carla Lambertini).*

**Figure 2.7.9** - *Hunting wetland in Marcabò during the summer (same wetland as Fig. 1.7.9). (Photo Carla Lambertini).*

## 2.8 - THE LIFE AGROWETLANDS II ENVIRONMENTAL DATABASE

Within the LIFE AGROWETLANDS II project a considerable amount of data has been surveyed in the project area. The first phase of processing this information was completed through the creation of a single centralized environmental database, with the aim of collecting each information layer within a unique geographical platform for subsequent analysis. The environmental database, containing the geo-referenced data collected by the working groups, was created using Open Source tools

## 2.8 - IL DATABASE AMBIENTALE DI LIFE AGROWETLANDS II

Il progetto LIFE AGROWETLANDS II ha consentito di acquisire una notevole mole di dati sul territorio oggetto di studio. I numerosi gruppi di lavoro coinvolti attivamente dal progetto, hanno contribuito al recupero di tali informazioni geografiche, ognuno per il proprio profilo di competenza. Tali dati sono inevitabilmente eterogenei per formato, contenuto e riferimenti geografici.

La prima fase di elaborazione di queste informazioni è stata completata attraverso la creazione di un unico database ambientale centralizzato, con l'obiettivo di raccogliere ogni strato informativo all'interno di una piattaforma univoca e fruibile per successive analisi.

and accompanied by the corresponding metadata for each of the thematic layers, compliant with the requirements of the INSPIRE directive.

The main categories of data to be transferred in the database have been identified and uniquely labelled with a two-letter abbreviation: SO: soil; SS: soil salinity; CL: climate; WT: water table; WF: water flow; WQ: water quality; EQ: environmental quality; RS: remote sensing; AG: agricultural data. Finally, the database was uploaded into an appropriate shared access space on a server platform.

Tale processo si è svolto secondo un flusso di lavoro convenzionale (Fig. 2.8.1). La conformità della struttura dei dati e metadati, intrinsecamente eterogenei all'origine, che sarebbero gradualmente confluiti all'interno del database, è stata impostata in rispondenza ai requisiti della direttiva INSPIRE. Per raggiungere il risultato desiderato, è stata approfondita e concordata la forma idonea di rappresentazione delle informazioni raccolte con addetti e responsabili alla collezione dei dati per i diversi gruppi di lavoro. Da questi approfondimenti è stato possibile identificare le caratteristiche specifiche dei dati rappresentanti le diversificate caratteristiche dell'area di studio, per una corretta conformazione ai fini della direttiva INSPIRE.



Figura 2.8.1. - Schema concettuale del flusso di dati.

Figure 2.8.1 - Conceptual data flow diagram.

In una successiva fase, sono state definite le informazioni comuni a tutti gli strati informativi per la realizzazione dei rispettivi metadati, necessari per soddisfare le specifiche della direttiva INSPIRE. Tali informazioni sono state raccolte

ed omogeneizzate per ogni dato acquisito all'interno dell'intera area di studio. Sono state quindi identificate le principali macro categorie di dati da convogliare all'interno del database ambientale, etichettate univocamente con



una sigla composta da due lettere:

- SO: soil
- SS: soil salinity
- CL: climate
- WT: water table
- WF: water flow
- WQ: water quality
- EQ: environmental quality
- RS: remote sensing
- AG: agricultural data

E' stato inoltre individuato il limite geografico dell'area in analisi secondo le seguenti coordinate geografiche che identificano il poligono di confine: 44.60° latitudine Nord, 44.50° latitudine Sud, 12.13° longitudine Ovest,

12.30° longitudine Est. Ogni stratigrafia tematica (layer) contenente informazioni geografiche è stata quindi opportunamente convertita nel sistema di riferimento definito per il progetto secondo la direttiva INSPIRE, con datum European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) e proiezione nel fuso 33 Nord (EPSG:3045) all'interno del quale è situata l'area di studio.

Il database ambientale (Fig. 2.8.2), contenente i dati geo-referenziati raccolti dai gruppi di lavoro, è stato realizzato mediante strumenti Open Source ed accompagnato dai metadati corrispondenti per ognuno dei layer tematici, con informazioni conformi a quanto richiesto in materia dalla direttiva INSPIRE. Il database è stato quindi inserito all'interno di apposito spazio ad accesso condiviso su piattaforma server.

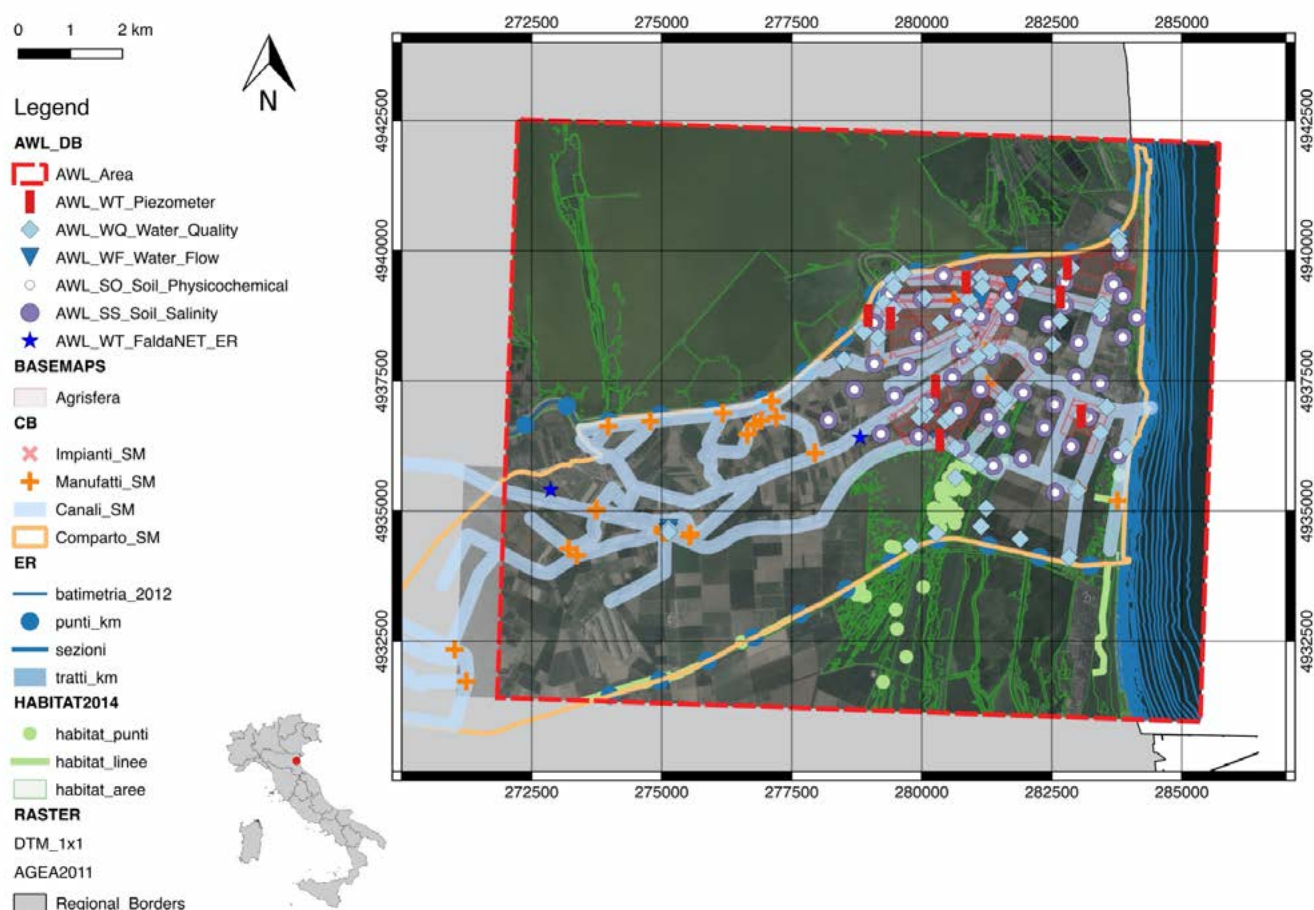
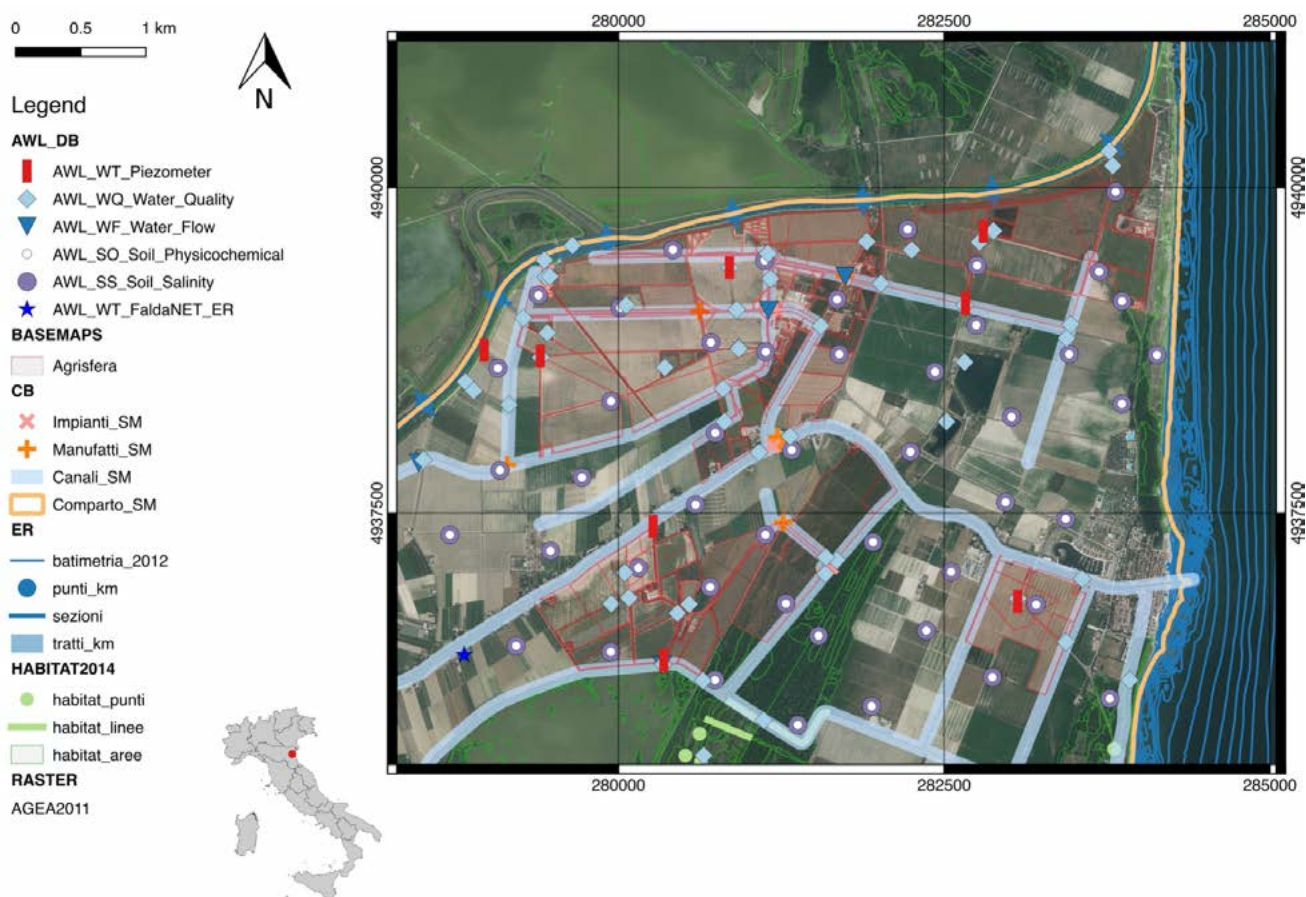


Figura 2.8.2. - Rappresentazione cartografica dei dati raccolti in database all'interno dell'area del progetto.

Figure 2.8.2 - Map of the geo-referenced data base of the project area

Ulteriori aggiornamenti ed integrazioni al database ed alle relative componenti cartografiche sono seguiti per la durata del progetto LIFE AGROWETLANDS II (Fig. 2.8.3) insieme a successive ottimizzazioni

della struttura di progetto GIS, per un'efficiente consultazione remota dei dati contenuti su disco NAS da differenti piattaforme e sistemi operativi.



**Figura 2.8.3.** - *Rappresentazione cartografica di dettaglio per l'area analizzata.*

**Figure 2.8.3.** - *Detail map of the analyzed area.*

La struttura principale del database può essere così riassunta:

- **AWL\_DB:** contiene i dati vettoriali rilevati ed elaborati per il progetto. Per ogni strato informativo la struttura include diversi elementi:

- GML: informazioni geografiche atte al caricamento su piattaforma GIS,
- CSV: informazioni tabellari in formato grezzo per immediato utilizzo su foglio di calcolo o inserimento in procedure automatiche di elaborazione,
- XML: metadati conformi a quanto descritto dalla Direttiva INSPIRE.

- **BASEMAPS:** contiene stratigrafie informative di base disponibili per l'area di progetto.

- **RASTER:** contiene i dati in formato raster relativi all'intera area di progetto, come ortofoto e modelli del terreno.

- **SHP:** contiene i dati vettoriali convertiti in formato standard Shapefile per garantire ulteriore compatibilità con piattaforme GIS di terze parti e l'utilizzo degli stessi secondo i requisiti dei flussi di lavoro adottati dai gruppi di lavoro afferenti al progetto.

Di seguito un ulteriore esempio di consistenza dei dati per la specifica categoria RS (remote sensing):

- LIDAR: dati acquisiti dal Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A).
- UAV: dati acquisiti da Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (SAPR) durante i sorvoli compiuti nel 2019 e successivamente elaborati, su area campione pari a 5 ettari come da specifiche di progetto ed ulteriori dettagli descritti nel rispettivo capitolo.
- SAT: dati acquisiti da piattaforma satellitare multispettrale WorldView-3 su 8 bande alle seguenti lunghezze d'onda nominali: 425 nm, 480 nm, 545 nm, 605 nm, 660 nm, 725 nm, 832 nm, 950 nm.

Infine, è stato realizzato un manuale guida utente (Fig. 2.8.4) con specifiche informazioni e istruzioni per l'accesso al database ed indicazioni per l'utilizzo di software Open Source atto a visualizzare le componenti geografiche dei dati raccolti ed ulteriori istruzioni per l'accesso allo spazio condiviso su piattaforma server.



**Figura 2.8.4.** - Copertina del manuale utente all'utilizzo del database.

**Figure 2.8.4** - Cover of the user manual for the use of the database

## 2.9 - THE WIRELESS SENSORS NETWORK

Life Agrowetlands II wireless sensors network (WSN) is one of the largest wireless networks in the region for agriculture. It monitors an area of about 30 km<sup>2</sup> and will be active also in the After LIFE phase of the project. The WSN consists of 23 nodes, each equipped with several sensors: 2 meteorological stations, 9 piezometers combined with soil sensors measuring groundwater and soil electric conductivity (salinity), 3 nodes with only soil sensors, 11 hydrometers monitoring water parameters along the channels throughout the district (Fig. 2.9.1).

The sensors were purchased by the partners Agrisfera, OSV and Winet S.r.l., while the installation was carried out by Winet Srl. The registered data are transmitted to

a server every 10 minutes through a robust algorithm developed by Winet Srl. The server makes the recorded data available both for the Decision Support System (DSS) and the registered farmers. Life Agrowetlands II portal shows crops conditions and irrigation advice, and, through the portal, the farmers update the DSS with irrigation management, i.e. irrigated water quantity and quality. The portal is available for smartphone. The data recorded by the WSN show large environmental and temporal heterogeneity in soil, groundwater and irrigation water salinity, and even in the meteorological conditions within the project area (Fig. 2.9.2). The salinity variation pattern was confirmed by a denser water sampling carried out in the project area in the first year of the project (Fig. 2.9.3, Fig. 2.9.4, Table 2.9.1).

## 2.9 - LA RETE WIRELESS DI SENSORI

La rete wireless di sensori (WSN), che è stata messa a punto da Agrowetlands II, e che rimarrà attiva anche nella fase di After LIFE, copre un'area di circa 30 km<sup>2</sup>. E' una delle reti wireless di maggior estensione tra quelle realizzate in ambito regionale per scopi agricoli, e forse una delle prime dedicate al monitoraggio di colture erbacee (Fig. 2.9.1).

Si tratta di una rete multifunzionale, predisposta per fornire dati meteorologici, compresi quelli necessari per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale (secondo l'equazione di Penman-Monteith), oltre ai parametri fisici del suolo, dell'acqua della falda freatica e dei canali.

La WSN consta di 23 nodi, ciascuno dotato di uno o più tipi di sensori, quali:

- 2 stazioni meteorologiche, comprensive di sensori per la misura della temperatura e umidità dell'aria, precipitazione, radiazione solare incidente, direzione e velocità del vento;
- 9 piezometri in falda freatica alla profondità di 3 metri (abbinati a sensori di suolo alla profondità di 50 cm) per la misura della conducibilità elettrica dell'acqua di falda e del suolo, temperatura e livello della falda;
- 3 nodi con soli sensori di suolo alla profondità di 50 cm che misurano l'umidità percentuale, il potenziale idrico, e

la temperatura del suolo;

- 11 idrometri con sensori di temperatura, conducibilità elettrica e livello dell'acqua, disposti sulla rete dei canali del comprensorio.

L'acquisto e il posizionamento dei sensori sono stati effettuati dai partner di progetto Agrisfera, Osv Srl e Winet Srl. La tecnologia di trasmissione wireless, l'installazione dei nodi e la loro alimentazione, nonché il mantenimento di funzionalità della rete nel tempo è stata curata da Winet Srl. L'algoritmo di trasmissione dei dati è stato sviluppato da Winet Srl e si basa sullo standard IEEE 802.15.4 (Adams, 2006) garantendo elevata affidabilità nella trasmissione, basso consumo ed elevata robustezza alle interferenze.

I dati registrati dalla rete, sono trasmessi ogni 10 minuti ad un server, che memorizza le informazioni e le rende disponibili sia al Sistema di Supporto alle Decisioni (Decision Support System, DSS), sia agli agricoltori registrati nel portale Agrowetlands II, che ricevono periodicamente il consiglio irriguo. In tal modo gli agricoltori possono anche seguire nel tempo l'evoluzione dei principali parametri ambientali che caratterizzano i loro appezzamenti. Il database che contiene i dati rilevati e memorizzati fin dall'inizio del funzionamento della rete nel 2017 può essere inoltre interrogato dagli utenti autorizzati.





**Figura 2.9.1.** - La rete wireless di sensori Life Agrowetlands II. I diversi colori abbinati a una delle seguenti lettere indicano nodi della rete diversamente attrezzati per il monitoraggio di: parametri del suolo (nodi di tipo S, in marrone), della falda (nodi di tipo P in verde), dell'acqua dei canali di irrigazione-drenaggio (nodi di tipo I in azzurro) e delle condizioni meteo (nodi di tipo P in giallo, attrezzati come i nodi di tipo P di colore verde, ma con l'aggiunta dei sensori per la misura di parametri meteorologici). (Immagine da: Speranza et al. 2020, Ecoscienza).

**Figure 2.9.1.** - Agrowetlands II wireless sensors network. The different colours combined with one of the following letters indicate nodes equipped with different sensors sets monitoring soil (brown type S nodes), groundwater (green type P nodes), irrigation-draining channels (light blue type I nodes) and meteorological conditions (yellow type P nodes, equipped like green type P nodes, with the addition of the meteorological sensors). (Image from Speranza et al. 2020, Ecoscienza).

Il portale Agrowetlands II è disponibile anche su smartphone, è organizzato per appezzamenti agricoli ed è uno strumento interattivo con l'agricoltore. Il portale evidenzia lo stato delle colture e i suggerimenti irrigui ad una certa data; l'agricoltore, a sua volta, aggiorna progressivamente il sistema sugli interventi agronomici effettuati nel corso della stagione agricola, in particolare sulla data delle irrigazioni praticate, sulla quantità e qualità dell'acqua utilizzata.

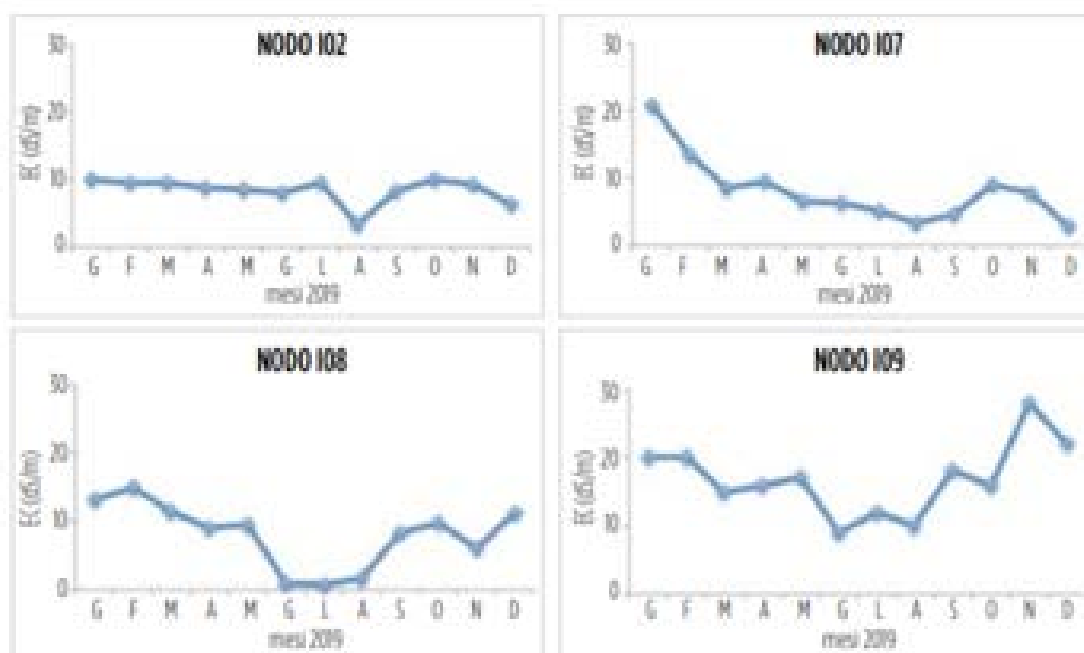
La rete ha consentito di raccogliere in media circa il 90% dei dati potenzialmente acquisibili. I dati persi sono dovuti a guasti dei sensori, problemi di trasmissione, carica insufficiente delle batterie. I

sensori più esposti sono gli idrometri in canale esposti all'attacco delle nutrie e più soggetti in ragione della distanza dal nodo coordinatore a difetti di trasmissione; hanno fornito circa l'80% dei dati acquisibili. All'estremo opposto le stazioni meteo, che installate sempre presso un nodo coordinatore, hanno fornito praticamente il 100% dei dati acquisibili.

Le registrazioni effettuate dai sensori nel corso del progetto hanno messo in evidenza una grande eterogeneità ambientale e temporale, anche tra appezzamenti contigui, nella salinità del suolo, dell'acqua di falda, dell'acqua di irrigazione, e anche delle condizioni meteorologiche. Per esempio, una differenza di circa 100 mm di precipitazione totale

annua è stata registrata nel 2019 tra le due stazioni meteo a circa 3 Km di distanza l'una dall'altra, con maggiore precipitazione nella stazione più distante dalla costa. La conducibilità elettrica dell'acqua dei canali è stata invece registrata più bassa durante la

stagione irrigua che quella invernale, quando cioè i consorzi di bonifica immettono acqua dolce nella rete di irrigazione, (Fig. 2.9.2). La salinità e il regime di portata dei canali rilevati dai sensori della rete WSN sono stati descritti nel capitolo 2.4.

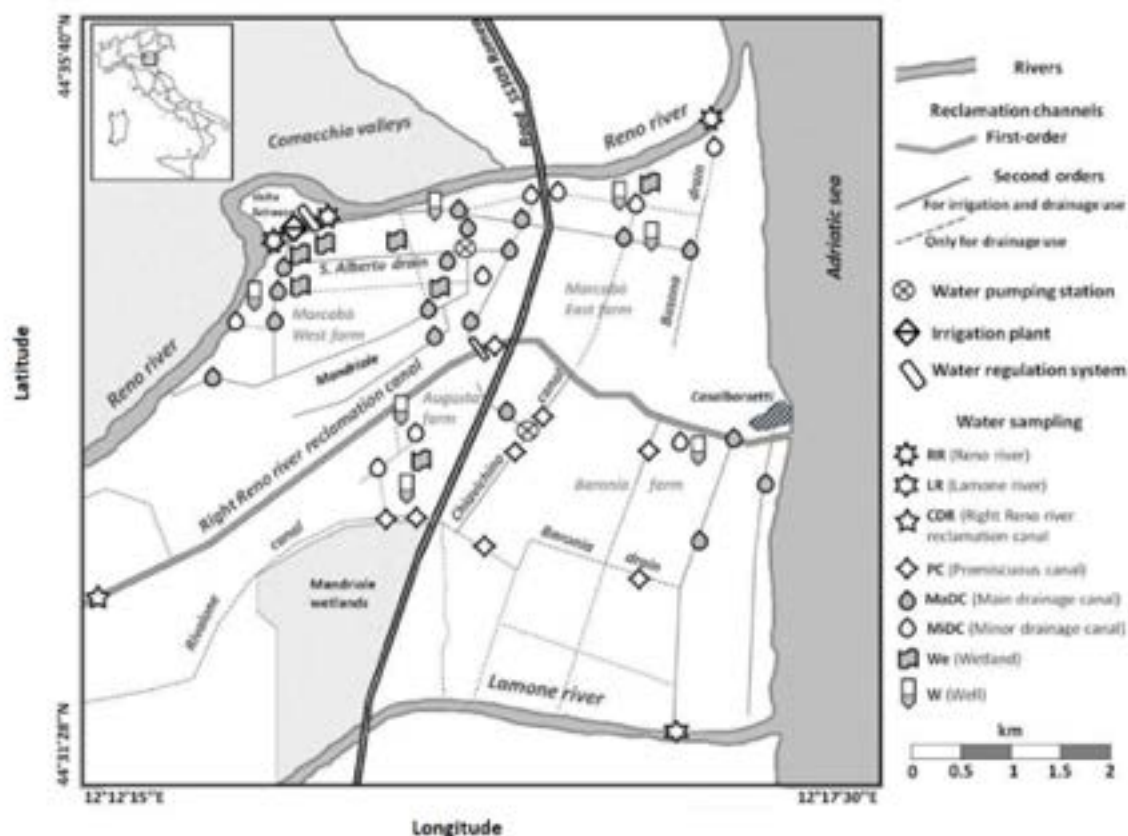


**Figura 2.9.2.** - Valori mensili di conducibilità elettrica (EC) dell'acqua dei canali registrati dalla WSN Agrowetlands II nel 2019. I valori più bassi di EC sono stati registrati durante la stagione irrigua. (Immagine da Speranza et al. 2020, Ecoscienza).

**Figure 2.9.2.** - Monthly average electrical conductivity (EC) values of channels water recorded by the Agrowet lands II network in 2019. The lowest EC values were recorded during the irrigation season (Image from Speranza et al. 2020, Ecoscienza).

La grande eterogeneità nella distribuzione della salinità è stata rilevata anche da due campagne di campionamento e analisi dell'acqua dei canali e dei pozzi nell'area progetto. I campionamenti sono stati eseguiti in periodo invernale (dal 21 dicembre 2017 al marzo 2018) e in periodo primaverile estivo, quando l'acqua è importante per il comporta irriguo (maggio -settembre 2018).

La Figura 2.9.3 evidenzia i punti di campionamento delle acque superficiali e profonde nell'area di progetto, i campioni sono stati suddivisi per tipo di corpo idrico e sono stati elaborati con un modello non parametrico (Kruskal-Wallis test) per apprezzare le differenze di salinità e di contenuto di nutrienti (Tabella 2.9.1).



**Figura 2.9.3.** - Posizionamento dei punti di campionamento dei corpi idrici superficiali e dei pozzi. (Immagine da Vittori Antisari et al. 2020, Minerals).

**Figure 2.9.3.** - Sampling locations of superficial and groundwater. (Image from Vittori Antisari et al. 2020, Minerals).

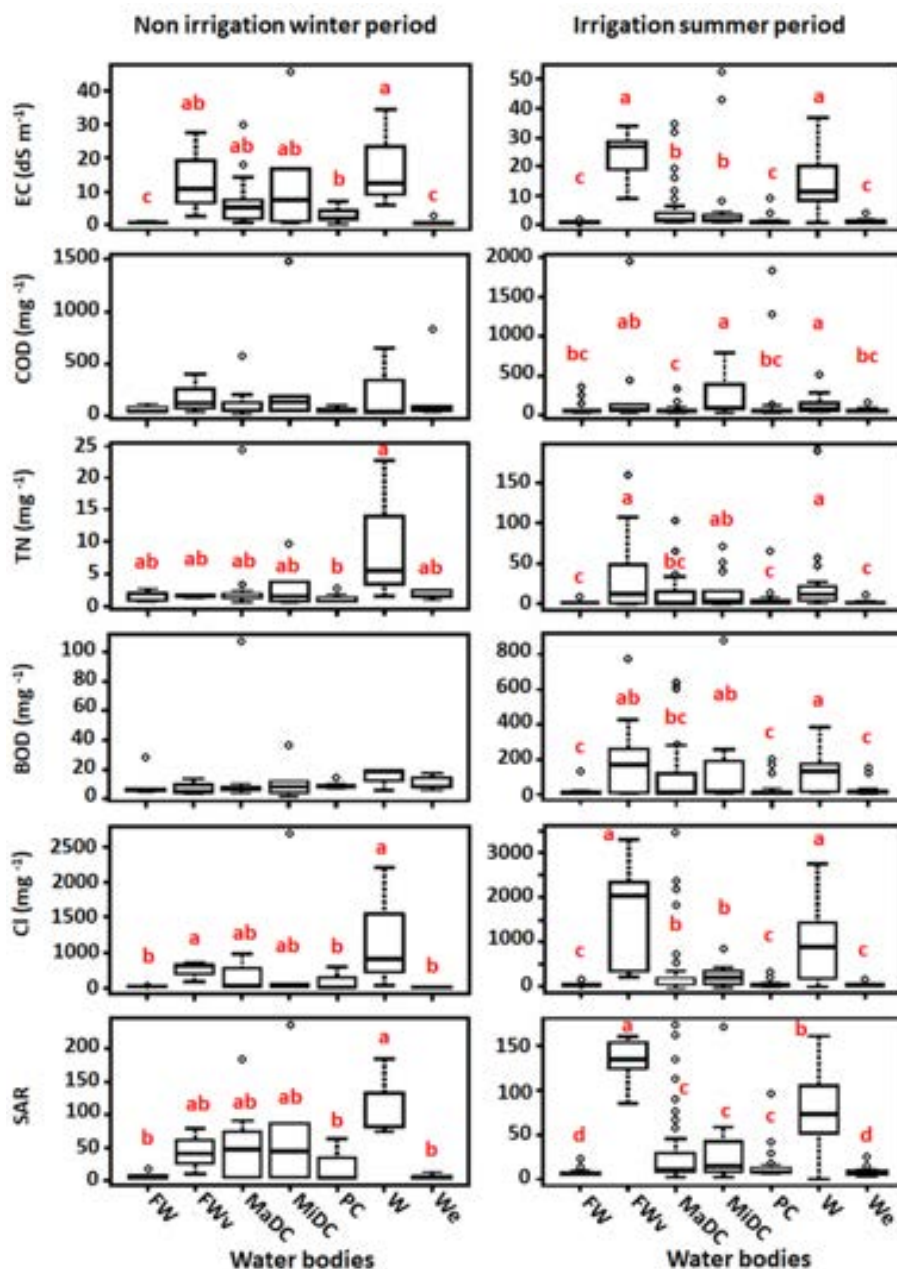
Localisation/identification	Water body types	Code	Water sample code
Fiume reno	Fiume	RR	FW – stazione di monte
			FWv – stazione di valle
Fiume Lamone	Fiume	LR	FW – stazione di monte
			FWv – stazione di valle
Canale destra Reno	Canale di bonifica	CDR	FW – stazione di monte
			FWv – stazione di valle
Canali principali di drenaggio	Canali di drenaggio	MaDC	MaDC
Canali minori	Canali di drenaggio e irrigazione	MiDC	MiDC
Canali promiscui	Canali di irrigazione e drenaggio	PC	PC
Wetland	wetland	WE	WE
Pozzi	Pozzi at 3 m of depth	W	W

**Tabella 1.9.1.** - Descrizione dei corpi idrici indagati. (da Vittori Antisari et al., 2020).

**Table 1.9.1.** - Description of the investigated water bodies. (from Vittori Antisari et al. 2020, Minerals).

Come la WSN, i campioni di acqua raccolti nel tempo evidenziano una grande variabilità dei valori misurati, con carichi di nutrienti inferiori nelle stazioni dei Fiumi a monte (FW) e nelle wetland (WE),

mentre i punti estremi più alti sono rappresentati dalle stazioni a valle dei fiumi (FWv) e dai pozzi (W) (Fig. 2.9.4).



**Figura 2.9.4.** - Conduttività elettrica (CE), domanda chimica di ossigeno (COD), contenuto totale di N (TN), domanda biologica di ossigeno (BOD), contenuto di Cl (Cl) e rapporto di assorbimento del sodio (SAR) nei campioni di acqua raccolti sia nel periodo invernale che nel periodo estivo di irrigazione dalle stazioni a monte e a valle del fiume Reno, del fiume Lamone e del canale del fiume Reno destro (rispettivamente FW e FWv), canale di drenaggio (MaDC), canale di drenaggio e irrigazione (MiDC), canale di drenaggio e irrigazione (PC), zone umide senza sbocco sul mare all'interno del terreno agricolo (W) e ben a 3 m di profondità (WE). Lettere diverse significano differenze significative ( $p < 0,05$ ). (Immagine da Vittori Antisari et al. 2020, Minerals).

**Figure 2.9.4.** - Electrical conductivity (EC), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen content (TN), Biological Oxygen Demand (BOD), Chlorine content (Cl) and Sodium Absorption Ratio (SAR) in the winter non-irrigation season and in the summer irrigation season upstream and downstream Reno and Lamone rivers and Right Reno channel (FW and FWv respectively), draining channel (MaDC), draining and irrigation channel (MiDC), draining and irrigation channel (PC), inland wetlands within the agricultural area without outlet to the sea (W) and at 3 m depth (WE). Different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ). (Image from Vittori Antisari et al. 2020, Minerals).



## 3. IL SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI DI LIFE AGROWETLANDS II

**3.1** - Systems that are presently used to issue irrigation suggestions in the involved regions are described: Irrinet in Emilia Romagna and Saltirsoil in the region of Valencia. Their characteristics, merits and limits are pointed out and reasons for using the selected method, AquaCrop, are finally presented.

### 3.1. - SISTEMI A CONFRONTO PER FORMULAZIONE DI CONSIGLI IRRIGUI IN AMBITO MEDITERRANEO

Decidere quando irrigare e quanta acqua utilizzare è problema che gli agricoltori della pianura padana si pongono da sempre. Scelta impegnativa per i potenziali effetti sulla coltura e per la necessità di commisurarsi con gli eventi futuri, siano questi le condizioni meteo o le caratteristiche dell'acqua utilizzata per la irrigazione, entrambi poco stabili.

Le caratteristiche principali che condizionano il consiglio sono:

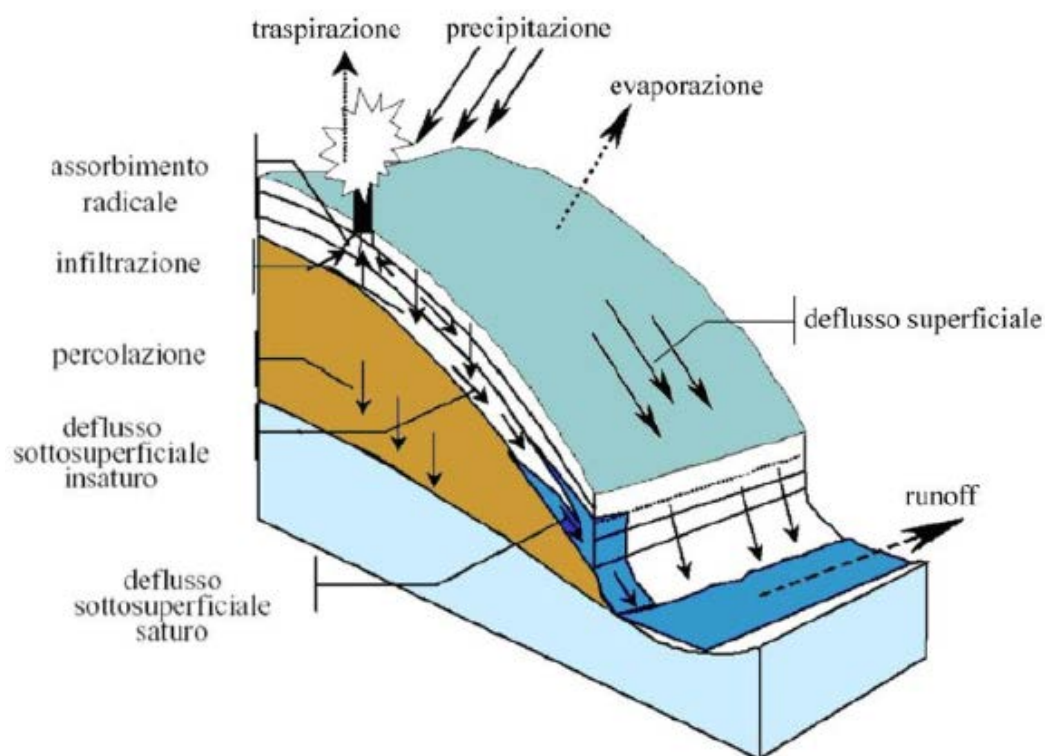
- le modalità di distribuzione dell'acqua in particolare la turnazione, se presente, che può condizionare drasticamente il periodo in cui l'acqua può essere distribuita a campo, e l'impianto irriguo da utilizzare che pone limiti alla portata che può essere distribuita,
- la coltura praticata, che determina un fabbisogno giornaliero di acqua,
- la profondità della falda freatica, che può contribuire per risalita capillare all'acqua disponibile, e le caratteristiche tessiture e di lavorazione del suolo che ne determinano la permeabilità e la capacità di trattenere acqua nella zona delle radici cosicché la coltura possa utilizzarla,
- l'utilità di limitare la quantità d'acqua impiegata perché la parte restante possa essere utilizzata da altri;

- le caratteristiche qualitative dell'acqua impiegata sia in termini di nutrienti che di contenuto di sali, in quanto la pianta mentre assorbe facilmente l'acqua, assorbe selettivamente ed in misura minore il sale ed i nutrienti; questi quindi possono accumularsi nei suoli attorno alle radici fino a costituire un impedimento al regolare sviluppo della coltura,

- le condizioni meteorologiche previste, l'acqua apportata essendo utilizzata e traspirata dalla coltura in un arco di tempo di circa due settimane .

Infine non va dimenticato che l'agricoltore ha l'ultima parola nel mettere in atto l'irrigazione e quindi il consiglio deve essere ed apparire utile e convincente, così che questi lo metta in atto e collabori con il sistema tenendolo informato dei fatti essenziali.

In regione Emilia Romagna è disponibile da tempo un sistema di supporto alle decisioni (DSS) finalizzato all'irrigazione IRRINET, sviluppato dal CER, che nel tempo si è affermato ed è ora sostenuto dal complesso dei Consorzi di Bonifica (e irrigazione) Italiani con il nome di IRRIFRAME. Il nome descrive bene la finalità: fornire agli agricoltori tramite la rete suggerimenti per l'irrigazione. Nasce avendo di mira la media e alta pianura, come si può desumere dalla figura seguente inserita nel manuale IRRINET ed. 2013; si è poi sviluppato in modo da tenere conto anche di falde poco profonde.



**Figura 3.1.1.** - Schema concettuale dei flussi idrici nel suolo nella prima versione di Irrinet.

**Figure 3.1.1.** - Conceptual diagram of water flow in the soil in the first version of Irrinet.

Il sistema Irrinet è basato su un modello concettuale di bilancio agro-idrologico che include quanto segue.

- Modello di evapotraspirazione effettiva e crescita della pianta, che data la coltura e le condizioni ambientali determina la evapotraspirazione di riferimento ( $ET_r$ , formula di Hargreaves) e, tenuto conto del coefficiente colturale, della evapotraspirazione potenziale della coltura, quindi quella effettiva debitamente ridotta in caso di carenza d'acqua; la crescita della pianta è determinata in relazione ai gradi-giorno necessari per ogni coltura a raggiungere le diverse fasi dello sviluppo.
- Modello di comportamento dell'acqua nel suolo. Il suolo è diviso in tre strati quello superficiale lavorato, lo strato delle radici delle colture annuali di spessore variabile con lo sviluppo di queste e lo strato sottostante. Le caratteristiche idrauliche del suolo sono desunte dalla tessitura (composizione in sabbia, limo e argilla) e per lo strato superficiale dalle lavorazioni praticate. Data la precipitazione effettiva e, l'irrigazione (passata), il sistema valuta l'eventuale ruscellamento superficiale, la percolazione negli strati inferiori e l'eventuale risalita d'acqua dalla falda e, tenuto conto dell'evapotraspirazione,

aggiorna il contenuto d'acqua nel terreno.

- Determinazione del volume di adacquamento. Sulla scorta di una pluriennale esperienza vengono fissati due livelli di soglia del contenuto d'acqua nel suolo, variabili con la coltura e il sistema di irrigazione, la cui differenza è pari alla lama d'acqua di irrigazione; l'irrigazione è suggerita quando, con l'asciugarsi del terreno, si raggiunge la soglia inferiore. La soglia superiore può essere pari alla capacità di campo o, frequentemente, inferiore a questa per avere un congruo spessore di suolo secco che accumuli le eventuali precipitazioni, evitando al contempo che l'acqua, percolando in profondità, non risulti utile per la resa della coltura.

Sul piano organizzativo, il sistema è basato sull'apprezzamento: un'area omogenea in quanto a suolo e coltura, spazialmente localizzata, che dal sistema è interfacciato:

- con i data-base ambientali delle regioni, da cui trae le condizioni meteorologiche (temperature, evapotraspirazione di riferimento e precipitazione), le caratteristiche del suolo e la profondità della falda;

- con un database di colture e metodi di irrigazione, da cui trae la durata delle fasi dello sviluppo ed i valori del coefficiente colturale da applicare in dette fasi, nonché le soglie di intervento irriguo;

- con l'agricoltore, a cui chiede la coltura praticata nell'appezzamento, date di semina e raccolta; all'agricoltore consente di correggere le indicazioni di sistema sulla precipitazione e la profondità della falda, invia in tempo reale per SMS il consiglio irriguo e richiede poi la misura della irrigazione effettivamente praticata.

Irrinet mal si adatta a fornire consigli idonei alle zone costiere per due motivi: 1) non considera né rappresenta la salinità dei suoli e delle acque, che in prossimità del mare può assumere effetti determinanti; 2) mirando, attraverso la soglia superiore, a contenere la percolazione in falda e con questo l'impiego di acqua per irrigazione (a vantaggio degli utenti di valle), non tiene conto che i deflussi superficiali nelle zone costiere o vengono utilizzati o vanno a mare, quindi se l'acqua è disponibile a nulla serve lasciarla defluire verso il mare. D'altra parte le utenze estreme di valle, ricevendo colature agricole e reflui civili ed industriali non possono di norma far conto su una elevata qualità dell'acqua. Tipico di queste aree è l'utilizzo abbondante di colature per la lisciviazione dei suoli e la rimozione dei sali che diversamente si accumulerebbero in essi.

Il progetto Agrowetlands II, per verificare la replicabilità del metodo proposto nell'area principale di studio, ha esteso in collaborazione con IVIA l'analisi all'area dei Carrizales di Elche (Spagna, regione di Valencia) prossima alla foce del fiume Segura, ove si pratica la irrigazione con acqua proveniente da detto fiume e già ripetutamente utilizzata a monte, acqua che ha una conducibilità elettrica tipica di 4 dS/m ed è distribuita in canali a gravità e da questi per scorrimento sui campi. Secondo i criteri normalmente adottati questa salinità consentirebbe solo la coltivazione di colture tolleranti come orzo, cotone, barbabietola, sorgo e della palma da datteri, ma non di colture moderatamente tolleranti come medica e carciofi, che sono invece diffusamente ivi praticate con irrigazione e lisciviazione abbondante ( $LF > 0.2$ ).

Nell'ambito del progetto è stato quindi utilizzato anche il DSS SALTIRSOIL (Visconti et al. 2011) messo a punto in

queste condizioni ambientali, DSS che, basandosi sostanzialmente sulle relazioni di bilancio a medio-lungo termine di acqua e sali in presenza voluta di drenaggio (lisciviazione) e sugli equilibri chimici dei diversi soluti, valuta la composizione di questi nel suolo nonché al drenaggio in uscita dal campo. Il DSS suggerisce quindi il valore di LF, rapporto fra acqua di drenaggio e acqua in arrivo sotto forma di precipitazione o irrigazione, ovvero l'eccesso di irrigazione rispetto a quanto strettamente necessario a sopperire alla evapotraspirazione possibile.

Il modello concettuale adottato nel DSS Smart Agrowetlands, si fonda sul modello AquaCrop sviluppato presso la FAO (Steduto et al., 2009). Esso comprende le potenzialità dei DSS sopra indicati: consiglio irriguo fornito in tempo reale evidenziando i problemi posti dalla salinità dell'acqua di irrigazione. Fornisce per di più una valutazione della data del raccolto, della resa presunta al raccolto in relazione alle future irrigazioni che si presumono necessarie, e della minor resa che deriva dalla salinità dei suoli e dell'acqua. Può essere usato sia per prevedere lo sviluppo della coltura, simulando condizioni meteorologiche attendibili, sia per ricostruire lo sviluppo effettivo della coltura e le condizioni del suolo simulando quanto effettivamente si è verificato, sia in forma mista, ricostruendo in base alla vicenda reale quanto avvenuto fino al giorno corrente e simulando, sulla base di condizioni meteo attendibili e di un criterio di irrigazione, quanto verosimilmente succederà fino al raccolto e, quindi, la resa prevista della coltura, evidenziando anche i condizionamenti che la hanno limitata.

Esso consente di rispondere a molte domande che l'agricoltore si pone, da quando è opportuno seminare, a quando e quanto irrigare, o se irrigare quando la qualità dell'acqua è scadente. Questa flessibilità unita alla disponibilità di dati di default per molte colture e suoli sono state le ragioni principali della scelta effettuata.

## 3.2 - AQUACROP: IL MODELLO DI RIFERIMENTO PER IL DSS SMART AGROWETLANDS

The main characteristics of the model AquaCrop are presented together with examples of its outputs, that inform the farmer about water and salt content in the soil, of crop development and forecast final production and probable stresses leading to its reduction.

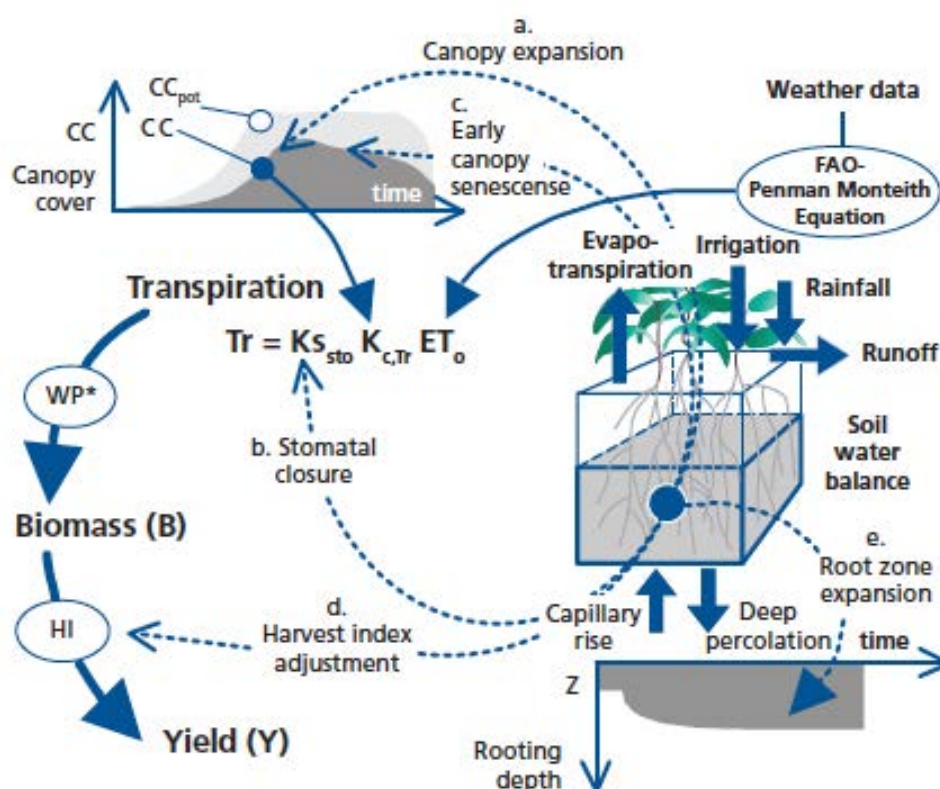
### 3.2. - AQUACROP: IL MODELLO DI RIFERIMENTO PER IL DSS SMART AGROWETLANDS

Il modello AquaCrop si basa essenzialmente

- sulla rappresentazione della circolazione dell'acqua nel sistema suolo-pianta-atmosfera,
- sulla assunzione che fra biomassa secca, prodotta e accumulata nella pianta, e acqua traspirata ci sia un rapporto costante, indicatore della efficienza di sviluppo della pianta, e che sia altrettanto costante il rapporto fra biomassa e resa commerciale, ad esempio granella di mais.

L'acqua traspirata è anche quasi proporzionale, se c'è abbastanza acqua nel suolo, alla radiazione solare, per cui la menzionata proporzionalità può essere interpretata anche come misura della efficienza fotosintetica della pianta.

Questa costante di produttività dell'acqua traspirata (Water Productivity) non varia molto da coltura a coltura ed è maggiore per le specie che hanno una fotosintesi di tipo C4, come mais (1,25), il sorgo e in genere le grandi graminacee tropicali, ed è minore per le piante con fotosintesi di tipo C3 come il frumento (1,00), l'orzo, la soia o il cotone (0,85).



**Figura 3.2.1.** - Schema concettuale di AquaCrop. Sono evidenziate le influenze delle diverse componenti del processo rappresentato: suolo, percolazione e risalita dalla falda, coltura, crescita e senescenza della canopy, condizioni meteorologiche, traspirazione, crescita della biomassa e prodotto vendibile.

**Figure 3.2.1.** - Conceptual diagram of AquaCrop. The influences of the different components of the represented process are highlighted: soil, percolation and rising from the aquifer, crop, growth and senescence of the canopy, weather conditions, transpiration, biomass growth and salable product.



AquaCrop opera di norma su base giornaliera. A misura del tempo trascorso può usare sia i giorni solari che i gradi giorno (Growing Degree Day). La prima possibilità è da usare solo quando i tempi caratteristici dello sviluppo derivano da osservazioni locali, altrimenti è da preferirsi la misura in GDD, che rende i tempi dello sviluppo indipendenti o quasi dalle condizioni climatiche del luogo.

AquaCrop valuta la evapotraspirazione di riferimento in diversi modi, ma di fatto suggerisce la formula di Penman-Monteith adottata dalla FAO, facendo uso delle condizioni meteorologiche del giorno: temperature e umidità estreme, vento sfilato, radiazione solare incidente. AquaCrop prende atto inoltre della precipitazione del giorno.

Le caratteristiche del suolo vengono date per strati di diverso spessore; i parametri necessari sono il contenuto d'acqua a saturazione, alla capacità di campo (tensione dell'acqua nel suolo -33mb) e al punto di appassimento (tensione -15 bar). A partire da questi valori, attraverso le formule di van Genuchten, tensione dell'acqua e permeabilità del suolo all'acqua vengono valutate per qualunque contenuto o tensione dell'acqua nel suolo; in particolare può essere valutata l'acqua facilmente utilizzabile (contenuta nel suolo con tensione inferiore a 1 bar) e l'effetto meccanico della salinità, che, come conseguenza della pressione osmotica, innalza la tensione (o potenziale) dell'acqua e riduce la capacità della pianta di assorbire acqua. In carenza dei dati anzidetti, questi possono essere ricavati, ad esempio, con il software "Soil water characteristics" dell'USDA, nota la tessitura (percentuale di sabbia, limo e argilla), il contenuto di materia organica, la salinità e le caratteristiche di compattazione derivanti dalle lavorazioni meccaniche.

Dalla falda l'acqua può risalire per capillarità nei micropori del suolo trasportando sale e nutrienti in essa contenuti, o dal suolo umido oltre la capacità di campo l'acqua attraverso i macropori può percolare in falda trasportando anche in questo caso sali e nutrienti.

Le caratteristiche della falda in superficie, quota e salinità, debbono essere date tenendo conto della origine delle acque che vi si trovano; tale condizione non è critica se l'acqua percola verso una falda lontana.

Della coltura vanno dati i tempi di sviluppo nella fase vegetativa, la massima copertura raggiunta all'inizio della fase riproduttiva (fioritura), nonché i tempi di inizio della senescenza e di maturazione del raccolto, e la sensibilità ai diversi stress considerati.

La figura 3 sottostante mostra questi tempi, con i dati espressi in gradi-giorno. Questi dati dovrebbero essere forniti dalla ditta fornitrice della semente; in mancanza di questi essi possono essere scelti per analogia a colture simili.

In relazione allo sviluppo della parte aerea della coltura e del grado di copertura della vegetazione (canopy cover), AquaCrop valuta la profondità a cui giungono le radici e quindi la profondità dello strato da cui la coltura può estrarre acqua.

Altre informazioni importanti sono la sensibilità della coltura agli stress idrico, termico, salino e alle condizioni di fertilità del suolo; tali informazioni sono di norma di tipo qualitativo (ad es. sensibilità bassa/media/elevata).

Occorre infine specificare le irrigazioni (quando e quanto irrigare) o il criterio secondo cui effettuarle. La prima possibilità viene di norma scelta per rappresentare quanto avvenuto nel passato (in ricostruzione); vengono fornite le modalità di irrigazione (a pioggia, a goccia, per scorrimento), le date, i quantitativi dei singoli adacquamenti e la salinità dell'acqua di irrigazione.

Quando si debba operare in previsione si dovranno fissare ancora le modalità di irrigazione, il criterio di scelta del quando e quanto irrigare, e la qualità dell'acqua presunta.

In relazione al quando si danno alcune possibilità: a date fisse, situazione tipica quando sono stabiliti turni irrigui severi, o in relazione alla umidità del suolo minima che si sceglie di adottare; la quantità potrà essere fornita o come lama (volume per unità di superficie) d'acqua prefissata, o come percentuale dell'acqua facilmente

disponibile, quindi in misura assoluta variabile con la profondità delle radici.

Per il quanto si potrà irrigare fino a raggiungere la capacità di campo, o un livello più umido quando si voglia per lisciviazione rimuovere sale dai suoli, o più basso quando si voglia limitare l'impiego di acqua o per trattenere con maggior certezza l'acqua delle precipitazioni successive. Deve essere notato che non sempre irrigare di meno comporta un minor consumo d'acqua, perché il successivo intervento non è indipendente da quello in questione, e irrigando meno potrebbe rendersi necessaria un'irrigazione integrativa non sempre ottimale per quantità.

I parametri del criterio possono variare nel tempo, tipicamente a fine di seguire lo sviluppo fenologico della coltura e la associata sensibilità allo stress idrico.

La figura 4 sottostante mostra un esempio di criterio di irrigazione (la modalità è risultata imposta dalle dotazioni dell'Azienda: irrigazione a pioggia con rotolone) da applicarsi in Regione (Emilia Romagna). Il primo criterio indicato vale fino alla data indicata per esso e l'ultimo dopo la data associata. Per inibire la irrigazione occorre indicare un valore 'infinito', non rappresentato in figura, per rappresentare ad esempio il disciplinare regionale che suggerisce di non irrigare fino al 15 giugno. Nell'esempio la lama di irrigazione è prevista come quota parte dell'acqua facilmente disponibile fino alla capacità di campo utilizzando acqua di qualità eccellente, con maggiore umidità del suolo (minore essiccazione) assicurata nel periodo della fioritura.

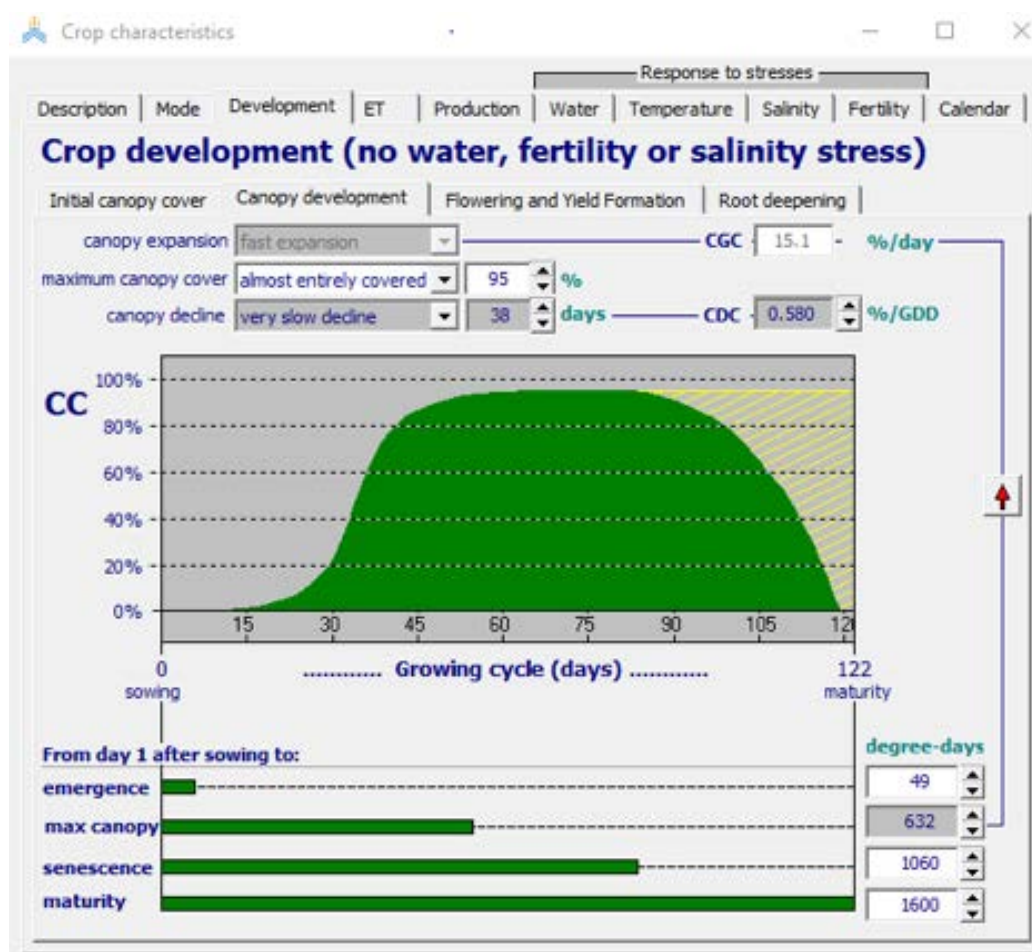


Figura 3.2.2. - Un esempio di interfaccia con AquaCrop. Parametri richiesti per rappresentare lo sviluppo della copertura vegetale in assenza di stress; lo sviluppo rappresentato è descritto nella figura centrale.

Figure 3.2.2. - An example of interface with AquaCrop. Parameters required to represent the development of vegetation cover in the absence of stress; the development shown is described in the central figure.

Irrigation management

## Generation of irrigation schedule

Mode | Irrigation method | Time and Depth criteria

### Time and depth criteria

soil bunds

**Time Criteria**

- ☐ Fixed interval
- ☐ Allowable depletion (mm water)
- ☒ Allowable depletion (% of RAW)
- ☐ Water layer between bunds

**Depth Criteria**

- ☒ Back to Field Capacity
- ☐ Fixed net application

**Irrigation water quality**

EC<sub>w</sub> 0.0 dS/m

assign

Day No. 1 - day 1 after sowing: 11 May 2018

valid From

When ?

Depth ?

Quality

Date	Day No.	Depleted % RAW	To FC +/- (mm)	dS/m
15 June 2018	36	80	0	0.7
1 July 2018	52	65	0	0.7
24 July 2018	75	65	0	0.7
28 July 2018	79	80	0	0.7

Growing cycle

Canopy Cover

Thresholds

Day No. 122 - maturity: 9 September 2018

Clear All Events

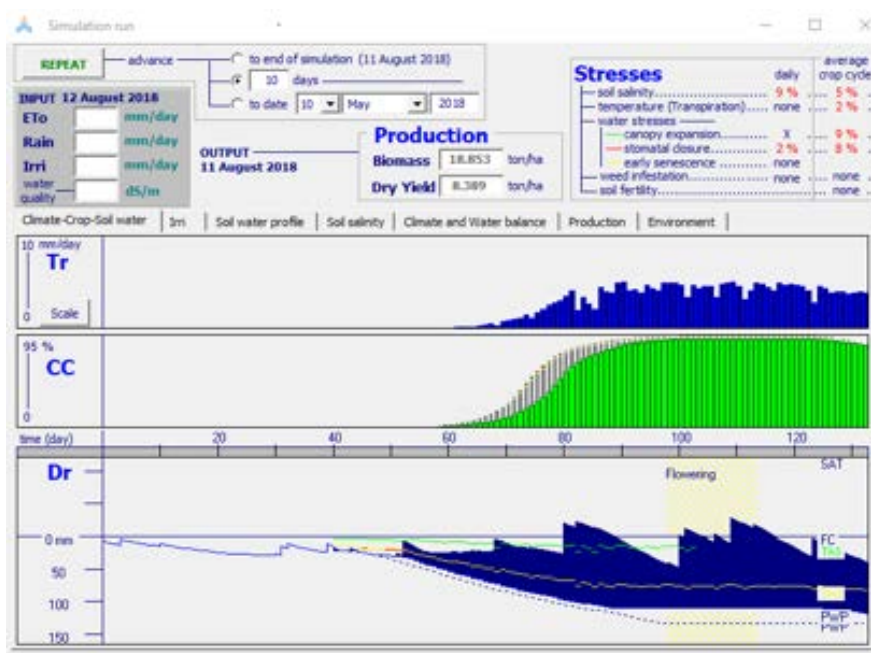
**Figura 3.2.3.** - Esempio di criterio di irrigazione. Alle diverse date debbono essere forniti il livello di essiccazione del terreno a cui intervenire, il livello di umidità dopo l'irrigazione e la salinità dell'acqua utilizzata.

**Figure 3.2.3.** - Example of an irrigation criterion. At different dates, the level of drying of the soil to be intervened must be provided, the level of humidity after irrigation and the salinity of the water used.

La simulazione viene avviata e procede fino ad una data specificata. I risultati della simulazione sono salvati su un file che può poi essere usato per simulare un criterio irriguo diverso da applicare successivamente.

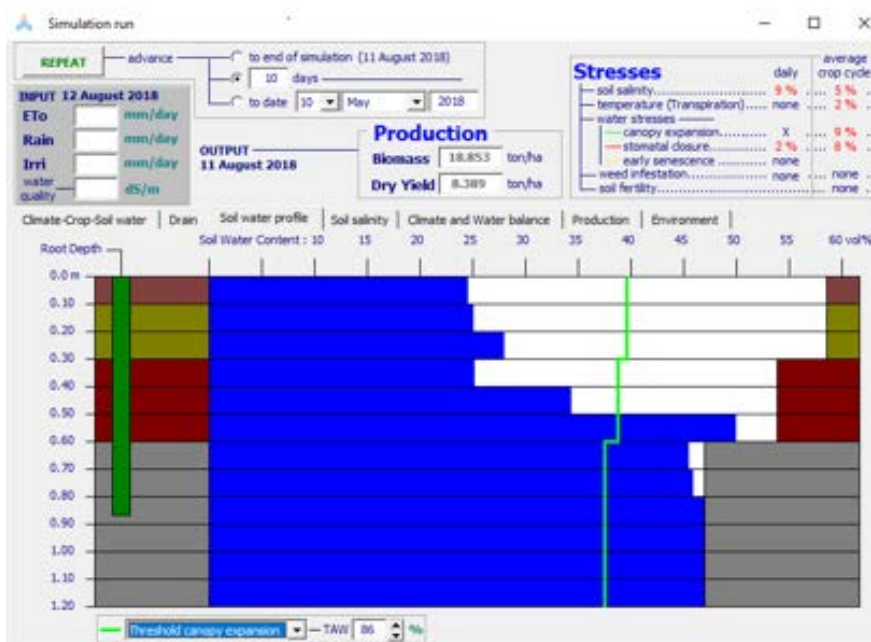
La simulazione non deve necessariamente ricoprire l'intervallo su cui è dato il criterio, ma al contrario il

criterio deve coprire l'intero intervallo di simulazione. I risultati possono poi essere riletti e presentati in varie forme: diagrammi temporali di varie grandezze , con la indicazione della produzione ottenuta e degli stress sopportati dalla coltura, vedi figura 3.2.4, oppure come profilo di umidità e di salinità al termine della simulazione, vedi figure 3.2.5 e 3,2,6.



**Figura 3.2.4.** - Diagrammi di evoluzione temporale. Si è scelto di rappresentare la traspirazione ( $Tr$ ) proporzionale al tasso di crescita della biomassa, la canopy cover ( $CC$ ) potenziale e prevista, e la disponibilità d'acqua ( $Dr$ ) nel tempo, con evidenziati i limiti che non andrebbero superati sia in fase di essiccazione (linea gialla) che al termine dell'irrigazione (linea verde), rispettivamente per non determinare stress idrico o inibizione dello sviluppo delle foglie.

**Figure 3.2.4.** - Diagrams of temporal evolution. It was chosen to represent the transpiration ( $Tr$ ) proportional to the biomass growth rate, the potential and expected canopy cover ( $CC$ ), and the availability of water ( $Dr$ ) over time, with highlighted limits that should not be exceeded both in the drying phase (yellow line) and after irrigation (green line), respectively, in order not to cause water stress or inhibition of leaf development.



**Figura 3.2.5.** - Profilo di umidità del suolo. Sono indicati gli strati e la profondità delle radici, la capacità di ritenzione idrica, la ritenzione effettiva e la soglia di sviluppo della canopy (linea verde); si vede che gli strati profondi sono saturi o semisaturi, mentre quelli superficiali sono ben aerati.

**Figure 3.2.5.** - Soil moisture profile. The layers and depth of the roots, the water retention capacity, the effective retention and the development threshold of the canopy are indicated (green line); it is seen that the deep layers are saturated or semi-saturated, while the superficial ones are well ventilated.



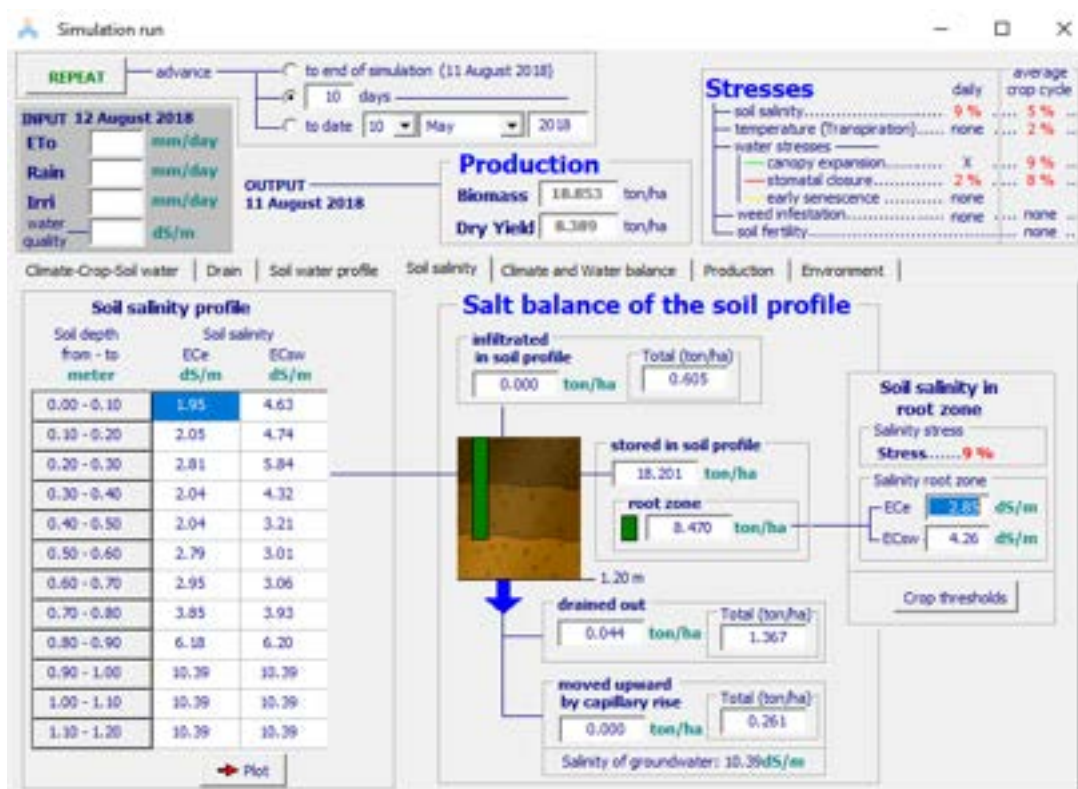


Figura 3.2.6. - Profilo di salinità del suolo. ECe è la conducibilità dell'acqua estratta da pasta satura, misura del contenuto di sali nel suolo, ed ECsw è la conducibilità dell'acqua nei pori da cui deriva la tensione osmotica e lo stress idrico.

Figure 3.2.6. - Soil salinity profile. ECe is the electrical conductivity of the saturated soil extract, a measure of the salt content in the soil, and ECsw is the conductivity of the water in the pores on which the osmotic tension and water stress depend.

**3.3.** The FAO AquaCrop model simulates the final yield in four successive steps: simulation of green canopy cover development, crop transpiration, above ground biomass production and crop yield. Compared to some other crop growth models, AquaCrop requires relatively few input parameters. The set of input data consists of climatic, crop, soil and groundwater parameters, field and irrigation management data. AquaCrop allows to take into account the salt flows entering and leaving the examined soil profile and allows to consider the effect of soil and water salinity by modulating the development of canopy cover, crop transpiration and biomass production.

### 3.3 - I PARAMETRI RICHIESTI DA AQUACROP

Per il DSS Smart Agrowetlands si è scelto di utilizzare il modello AquaCrop, sviluppato dalla Divisione Suolo e Acqua della FAO (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009) per la simulazione dello sviluppo vegetativo e della resa produttiva delle colture, poiché

- richiede un numero relativamente ridotto di parametri di input rispetto ad altri modelli colturali,
- è stato diffusamente calibrato e validato per varie colture in diversi ambienti pedo-climatici,
- permette di tenere conto dei flussi di sale in entrata ed in uscita dal profilo di suolo esaminato e consente di considerare l'effetto della salinità del suolo e delle acque di falda e di irrigazione modulando lo sviluppo della copertura fogliare, la traspirazione e la produzione di biomassa.

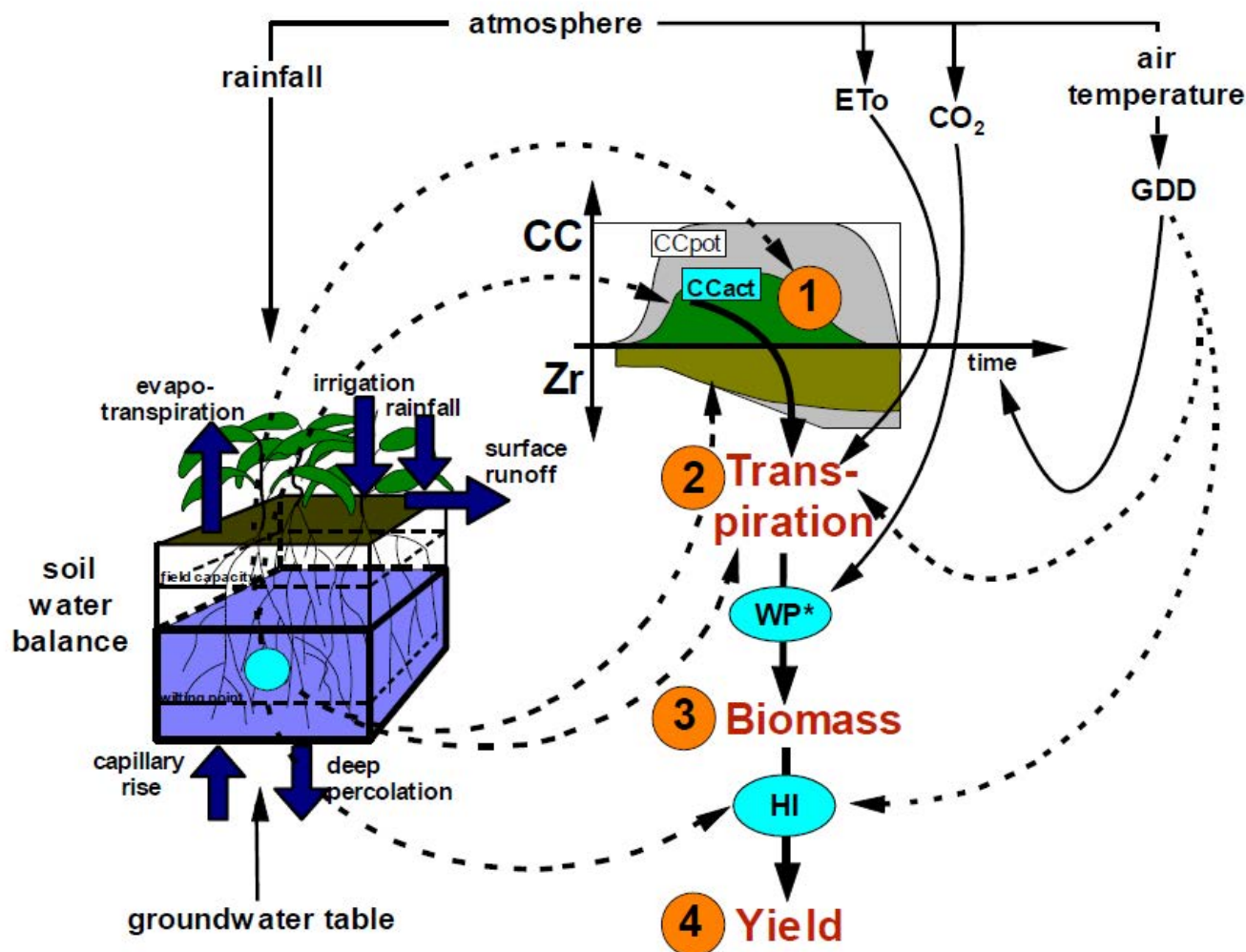
Il modello AquaCrop simula la produzione finale in quattro passi successivi (Figura 1):

1) al primo passo viene simulato lo sviluppo della copertura fogliare espresso come green canopy cover (CC), ovvero come frazione di superficie di suolo coperta dalla vegetazione. CC varia fra 0 (prima dell'emergenza) ed un valore massimo CC<sub>x</sub> prossimo ad 1 a seconda del tipo di coltura e della densità di semina. Lo sviluppo fogliare in condizioni ottimali viene modellato attraverso quattro parametri: la canopy cover iniziale al 90% dell'emergenza (CC<sub>0</sub>), la massima canopy cover raggiunta nel pieno sviluppo (CC<sub>x</sub>), il coefficiente di crescita (CGC) ed il coefficiente di declino (CDC) della canopy utilizzati rispettivamente per descrivere l'espansione e l'ingresso in senescenza delle foglie. L'utilizzo della copertura fogliare CC anziché del LAI (Leaf Area Index) costituisce una caratteristica fondamentale del modello AquaCrop; la

sua espansione, invecchiamento e senescenza, insieme alla conduttanza stomatica, determinano la quantità di acqua traspirata, che a sua volta incide sulla quantità di biomassa prodotta (Steduto et al., 2012). Simulando il contenuto d'acqua nel profilo verticale di suolo con passo giornaliero, AquaCrop identifica gli eventuali stress che possono svilupparsi nella zona delle radici durante il ciclo della coltura. Lo stress idrico può influire sull'espansione della canopy cover e, in condizioni severe, può innescare una senescenza precoce. L'effetto della temperatura dell'aria sullo sviluppo fogliare è simulato attraverso l'impiego dei gradi giorno, per il cui calcolo sono richiesti una temperatura di base, al di sotto della quale la coltura non germina e non si sviluppa, ed un valore limite massimo oltre il quale si arresta l'accrescimento. Lo stress causato dalla limitata fertilità del suolo viene rappresentato in AquaCrop mediante una riduzione dell'espansione fogliare, un più lento sviluppo della canopy ed un declino costante dopo il raggiungimento del valore massimo (FAO, 2018a). La presenza di sali disciolti nella zona delle radici produce uno stress di natura osmotica dovuto alla diminuzione del potenziale idrico nel suolo ed una maggiore difficoltà nell'assorbimento di acqua da parte delle radici con un rallentamento della traspirazione. L'effetto dello stress dovuto alla salinità del suolo sullo sviluppo della copertura fogliare viene simulato da AquaCrop con un approccio simile a quello utilizzato per descrivere la risposta della coltura alla limitata fertilità del suolo.

2) al secondo passo viene calcolata la traspirazione delle piante (Tr<sub>x</sub>) che in condizioni ottimali è proporzionale alla canopy cover ed è ottenuta moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento E<sub>To</sub> per il coefficiente colturale K<sub>c</sub>:

$$Tr_x = K_c \times E_{To} \quad \text{con} \quad K_c = CC^* \times K_{cTr,x}$$



**Figura 3.3.1.** - Schema di calcolo del modello AquaCrop derivato da FAO (2017) con indicazione (mediante frecce tratteggiate) dei processi interessati da stress idrico e termico. CC è il grado di copertura fogliare verde o green canopy cover, Zr la profondità delle radici,  $ET_0$  l'evapotraspirazione di riferimento,  $WP^*$  la produttività idrica normalizzata, HI l'indice di raccolta o harvest index, GDD i gradi giorno.

**Figure 3.3.1.** - Calculation scheme of the AquaCrop model derived from FAO (2017) with indication (dashed arrows) of the processes affected by water and thermal stress. CC is the simulated canopy cover, Zr the root depth,  $ET_0$  the reference evapotranspiration,  $WP^*$  the normalized water productivity, HI the harvest index and GDD the growing degree days.

dove  $CC^*$  è la canopy cover effettiva, adeguata, mediante una relazione empirica, per tenere conto degli effetti micro-avveviti tra i filari, importanti quando la copertura non è completa, e  $KcTr,x$  è il coefficiente colturale quando la copertura fogliare ha raggiunto il suo pieno sviluppo (determinato dalle caratteristiche che contraddistinguono la coltura con una completa canopy cover dal prato di riferimento) (Steduto et al., 2009; Raes et al., 2009). Per la maggior parte delle colture agricole  $KcTr,x$  è nel range da 1.05 a 1.20 (FAO, 2017).  $ET_0$  è calcolata mediante la formula

di Penman-Monteith, come descritto in FAO Irrigation and Drainage Paper N. 56 (Allen et al., 1998), ed è fornita al modello come variabile di input (forzante).

Una volta raggiunta la  $CC_x$  in condizioni ottimali e prima della senescenza, la canopy invecchia lentamente e subisce una riduzione progressiva anche se piccola della traspirazione e della capacità fotosintetica. Questo processo viene simulato in AquaCrop applicando un coefficiente di invecchiamento (fage) che diminuisce giornalmente  $KcTr,x$  di una frazione piccola e costante,

dando luogo ad un coefficiente colturale adattato  $Kc_{Tr,adj}$ . Quando si attiva la senescenza, la traspirazione e la capacità fotosintetica della porzione verde di canopy diminuiscono in modo più marcato nel tempo. Questo effetto viene simulato in AquaCrop moltiplicando  $Kc_{Tr,adj}$  per uno specifico fattore di riduzione,  $f_{sen}$ , che decresce da 1 all'inizio della senescenza ( $CC = CC_x$ ) a 0 quando non vi è più copertura fogliare verde ( $CC = 0$ ):

$$Tr_x = CC^* \times Kc_{Tr,sen} \times ETo \quad \text{con} \quad Kc_{Tr,sen} = f_{sen} \times Kc_{Tr,adj} \quad \text{e} \quad f_{sen} = (CC / CC_x)^a.$$

L'esponente  $a$  è un parametro utilizzato per aumentare ( $a > 1$ ) o diminuire ( $a < 1$ ) la perdita di efficienza traspirante/fotosintetica della canopy in declino.

Per simulare la riduzione di traspirazione derivante da carenza idrica nella zona delle radici (che provoca la chiusura stomatica) o da eccesso di acqua (con conseguenti condizioni anaerobiche),  $Tr_x$  viene moltiplicato per il coefficiente di stress  $K_s$  relativo rispettivamente alla chiusura stomatica ( $K_{ssto}$ ) o alla immersione in acqua o carenza di aerazione ( $K_{saer}$ ) (Raes et al., 2009).

Un opportuno coefficiente di stress  $K_{sTr}$  viene inoltre utilizzato per rappresentare la riduzione della conduttanza stomatica alle basse temperature (FAO, 2018a):

$$Tr = K_s \times K_{sTr} \times Tr_x.$$

La presenza di sali disciolti incrementa l'effetto dello stress idrico sulla chiusura stomatica. Questo effetto viene simulato in AquaCrop riducendo ulteriormente  $K_{ssto}$  con un coefficiente di stress aggiuntivo  $K_{ssto,salt}$  (FAO, 2018a).

AquaCrop calcola l'evapotraspirazione effettiva ( $ET$ ) separando l'evaporazione del suolo ( $E$ ) dalla traspirazione  $Tr$  delle piante, in quanto è quest'ultima alla base della produzione di biomassa:  $ET = E + Tr$ . Per semplicità AquaCrop assume che  $E$  abbia luogo solo da terreno non ombreggiato e sia leggermente meno che proporzionale a  $(1 - CC)$  come risultato dell'adeguamento per l'avvezione interfilare.

3) al terzo passo viene calcolata la produzione giornaliera di biomassa aerea ( $Bi$ , l'indice  $i$  si riferisce al particolare giorno di simulazione), derivata dalla quantità di acqua traspirata ( $Tri$ ):

dove  $WP^*$  è la produttività idrica della coltura normalizzata per  $ETo$  e per la concentrazione di  $CO_2$  nell'atmosfera. La produttività idrica della coltura indica la quantità di sostanza secca fuori terra prodotta per unità di superficie coltivata e per unità di acqua traspirata. Molti esperimenti hanno dimostrato come la relazione tra la biomassa aerea prodotta e la quantità complessiva di acqua consumata da una determinata specie vegetale sia altamente lineare per una determinata condizione climatica. La normalizzazione utilizzata in AquaCrop per simulare la biomassa aerea rende il valore della produttività idrica applicabile a diversi ambienti, stagioni e concentrazioni di  $CO_2$ , inclusi scenari climatici futuri (FAO, 2018a). La normalizzazione della produttività idrica per la domanda evaporativa dell'atmosfera è ottenuta dividendo la quantità giornaliera di acqua traspirata ( $Tri$ ) per l'evapotraspirazione di riferimento del particolare giorno considerato ( $EToi$ ). La produttività idrica normalizzata per  $ETo$  è ulteriormente normalizzata per la concentrazione di  $CO_2$  attraverso la moltiplicazione per un fattore correttivo  $f_{CO_2}$  che dipende dal rapporto e dalla differenza fra la concentrazione di  $CO_2$  del particolare anno oggetto di simulazione e la concentrazione di riferimento che è data dal valore medio annuale (369.41 ppm) misurato all'Osservatorio Mauna Loa nelle Hawaii (USA) nel 2000. Valori indicativi di  $WP^*$  vanno da 30 a 35 g/m<sup>2</sup> per colture C4 e da 15 a 20 g/m<sup>2</sup> per colture C3.

Per colture con rese elevate in contenuto di lipidi e proteine è necessaria una maggiore energia per unità di sostanza secca prodotta dopo la fioritura e durante la fase di riempimento della granella/formazione dei frutti. Per tali colture AquaCrop utilizza un unico valore per  $WP^*$  fino alla fioritura, dopodiché  $WP^*$  viene gradualmente ridotto verso un valore più basso per tenere conto della diversa composizione chimica dei prodotti sintetizzati durante la formazione del raccolto (Steduto et al., 2012).

Poiché lo stress indotto dalla limitata fertilità del suolo potrebbe ridurre la produttività idrica delle colture, per simularne l'effetto viene utilizzato in AquaCrop il coefficiente di stress di fertilità del suolo per la produttività idrica delle colture  $K_{sWP}$ , variabile tra 1 e 0. Fintantoché la fertilità del suolo non influisce sul processo,  $K_{sWP}$  vale 1 e



WP\* rimane inalterato (FAO, 2018a).

4) infine, viene stimata la resa  $Y$  data dal prodotto della biomassa finale  $B$  per l'indice di raccolta o harvest index  $HI$ . L'indice di raccolta esprime il rapporto tra la produzione utile in sostanza secca (ad esempio la granella raccolta) e la produzione in sostanza secca dell'intera pianta, escluse le radici. Per colture di frutta o cereali, dopo una fase iniziale, a partire dalla fioritura, caratterizzata da un lento incremento di  $HI$  nel tempo, segue una fase con un tasso di crescita costante in cui  $HI$  aumenta linearmente nel tempo fino alla maturazione fisiologica. Il valore di  $HI$  comunemente raggiunto alla maturazione fisiologica in condizioni ottimali ed in assenza di fattori limitanti in input viene assunto come harvest index di riferimento ( $H_{lo}$ ) ed è un parametro caratteristico per una determinata cultivar. Verso la fine della formazione del raccolto può accadere che la rimanente copertura fogliare verde sia troppo ridotta per effetto di una precoce senescenza indotta da condizioni di stress e quindi la coltura non sia più in grado di raggiungere  $H_{lo}$ . In AquaCrop è definita una soglia minima di copertura fogliare verde ( $CC_{minimum}$ ) necessaria per la formazione del raccolto. Per ogni giorno dello stadio di riempimento della granella o di formazione del raccolto, AquaCrop mette a confronto la canopy cover effettiva  $CC$  con tale valore soglia, e qualora  $CC$  risultasse uguale o inferiore a  $CC_{minimum}$ , la crescita di  $HI$  si arresterebbe risultando in un valore inferiore,  $H_{ladj}$ , rispetto a quello di riferimento  $H_{lo}$  (FAO, 2018b).

Considerando l'harvest index di riferimento  $H_{lo}$ , la resa  $Y$  è data da:

$$Y = fHI \times H_{lo} \times B$$

dove  $fHI$  è un fattore moltiplicativo che tiene conto degli effetti degli stress che regolano l'harvest index rispetto al suo valore di riferimento. L'adeguamento dell'indice di raccolta ai deficit idrici e alla temperatura dell'aria dipende dall'entità e dal tempo di occorrenza dello stress durante il ciclo colturale. Gli effetti dello stress idrico sull'indice di raccolta possono essere positivi ( $fHI > 1$ ) o negativi ( $fHI < 1$ ). Si distingue inoltre tra condizioni di stress prima dell'inizio della formazione del raccolto, durante la fioritura con possibili conseguenze sull'impollinazione e durante la formazione del raccolto.

Uno stress idrico da lieve a moderato appena prima della fase riproduttiva (pre-antesi) in alcuni casi potrebbe incrementare  $HI$  rispetto al valore di riferimento  $H_{lo}$  per effetto della riduzione dell'accumulo di biomassa durante lo sviluppo vegetativo. AquaCrop include un algoritmo che consente di aumentare  $HI$  in funzione della biomassa relativa (Brel) all'inizio della fioritura e di un parametro specifico della coltura  $\Delta HI_{x, ante}$  regolabile. Brel è dato dal rapporto tra la biomassa effettiva  $B$  prodotta all'inizio della fioritura e la biomassa potenziale  $B_x$  prodotta in condizioni ottimali ed è assunto da AquaCrop come indicatore di stress idrici. Il valore di Brel può quindi variare tra 1 (in assenza di stress) e 0 (mancato sviluppo della coltura).  $\Delta HI_{x, ante}$  rappresenta l'aumento massimo ammissibile di  $HI$  per effetto dello stress prima della fioritura e viene espresso in percentuale. Esiste solo un particolare intervallo limitato di valori di Brel (corrispondente ad un leggero stress idrico) in cui  $HI$  può essere regolato. In AquaCrop l'ampiezza di questo intervallo è legata al valore assunto dal parametro  $\Delta HI_{x, ante}$ : maggiore è il valore adottato per  $\Delta HI_{x, ante}$ , più ampio sarà l'intervallo di valori di Brel su cui è consentita la regolazione. Il valore esatto dell'aumento in percentuale di  $HI$  ( $\Delta HI_{lante}$ ) è descritto da una funzione seno, priva di regolazione agli estremi dell'intervallo di Brel e con regolazione massima ( $\Delta HI_{x, ante}$ ) a 2/3 dell'intervallo stesso partendo dal limite inferiore (Raes et al., 2009; FAO, 2018b).

Generalmente quando le condizioni sono favorevoli le piante producono più fiori di quanto è necessario per un buon raccolto. I fiori in eccesso vengono poi lasciati cadere. L'eccesso di fiori presenti ( $f_{excess}$ ) è una costante che differisce da specie a specie. Un intervallo di tempo caratterizzato da stress idrico, da freddo o da calore alla fioritura può indurre una riduzione dell'indice di raccolta di riferimento se il numero totale di fiori impollinati non è sufficiente a raggiungere  $H_{lo}$ . Se le condizioni di stress riducono il numero totale di fiori impollinati di una piccola quantità, l'eccesso di fiori può far sì che sia ancora possibile raggiungere il potenziale produttivo e  $H_{lo}$  possa non risultarne influenzato. Uno stress importante e prolungato alla fioritura potrebbe dare luogo ad un numero totale di fiori impollinati non sufficiente a raggiungere

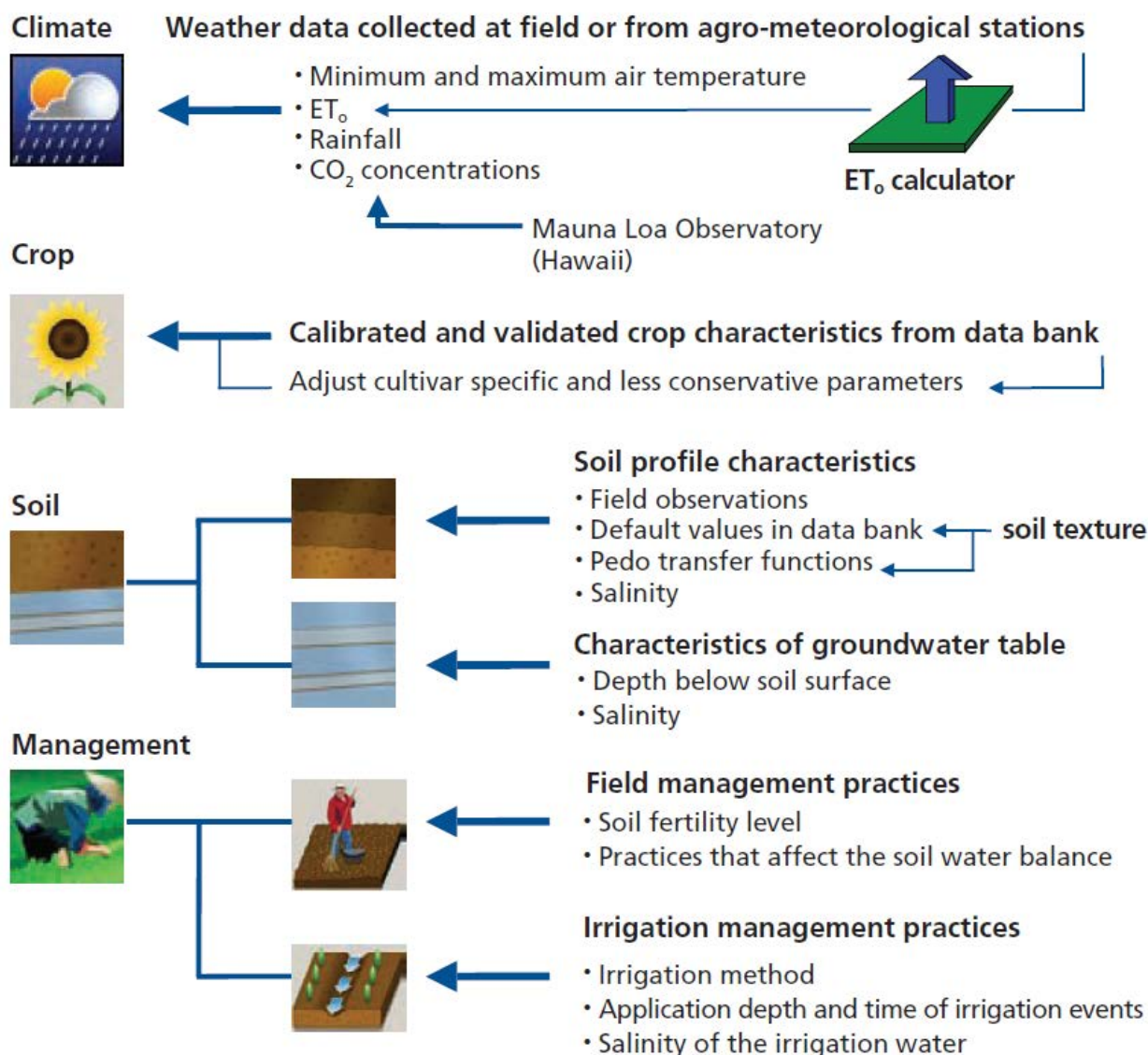
il potenziale produttivo e quindi ad un indice di raccolta inferiore a quello di riferimento  $H_0$ .

Un forte stress idrico al momento della fioritura può quindi inibire notevolmente l'impollinazione e l'allegagione. Questo effetto in AquaCrop viene simulato considerando un coefficiente di stress idrico del suolo per l'impollinazione,  $K_{spol,w}$ . Se il contenuto d'acqua nel profilo verticale di suolo considerato scende al di sotto di una determinata soglia ( $ppol$ ),  $K_{spol,w}$  diviene minore di 1 e l'impollinazione fallisce. Si assume che  $K_{spol,w}$  diminuisca linearmente da 1 in corrispondenza della soglia  $ppol$  fino a 0 al punto di avvizzimento permanente (permanent wilting point, PWP). Se la temperatura minima dell'aria scende al di sotto di una prefissata soglia ( $T_{n,cold}$ ) o la temperatura massima dell'aria aumenta oltre una determinata soglia ( $T_{x,heat}$ ), l'impollinazione potrebbe esserne influenzata. Questo effetto viene simulato in AquaCrop considerando un coefficiente di stress da freddo ( $K_{spol,c}$ ) ed un coefficiente di stress termico ( $K_{spol,h}$ ) per l'impollinazione. Quando la temperatura minima dell'aria in un determinato giorno scende al di sotto della soglia di temperatura specificata  $T_{n,cold}$ , il coefficiente di stress da freddo  $K_{spol,c}$  risulterà inferiore a 1.  $K_{spol,c}$  si annulla in corrispondenza di una soglia inferiore posta 5 gradi al di sotto di  $T_{n,cold}$  e una funzione logistica è utilizzata come funzione di risposta tra le due soglie. Allo stesso modo, quando la temperatura massima dell'aria supera la soglia di temperatura specificata  $T_{x,heat}$ , il coefficiente di stress termico  $K_{spol,h}$  risulterà inferiore a 1.  $K_{spol,h}$  si annulla in corrispondenza di una soglia superiore posta 5 gradi sopra  $T_{x,heat}$ . Al di fuori del periodo di stress, i coefficienti  $K_{spol,c}$  e  $K_{spol,h}$  valgono 1.

Durante la fase riproduttiva, lo stress idrico può alterare l'HI finale a seconda della sensibilità della coltura, del momento di occorrenza e della gravità dello stress. Fintantoché lo sviluppo vegetativo è ancora possibile, un lieve stress idrico tende a migliorare l'HI limitando la crescita delle foglie e dirottando i carboidrati per essere utilizzati nel riempimento della granella o nella formazione dei frutti. Pertanto, il tasso di crescita giornaliero di HI ( $dHI/dt$ ) accelera se, man mano che diminuisce il contenuto di acqua nel suolo, viene raggiunta la soglia per

l'espansione fogliare ed il corrispondente coefficiente di stress idrico per l'aumento di espansione fogliare  $K_{sexp,w}$  scende al di sotto di 1. L'introduzione di un opportuno parametro caratteristico della coltura permette inoltre di accentuare o ridurre l'impatto dello stress idrico su HI. Con l'intensificarsi dello stress idrico, non solo la crescita delle foglie ma anche l'apertura stomatica viene inibita. La conseguente ridotta disponibilità di sostanze nutritive prodotte dalla fotosintesi rallenta l'aumento di HI. AquaCrop simula questo effetto basandosi sul declino del coefficiente di stress idrico per la chiusura degli stomi ( $K_{ssto}$ ). Nell'adeguamento complessivo per lo stress idrico, poiché la soglia per l'inibizione dell'espansione fogliare è molto più alta di quella per l'inibizione degli stomi, quando si sviluppa lo stress il tasso di crescita di HI è prima accelerato dallo stress intensificante, quindi ridotto quando gli stomi chiudono limitando la fotosintesi. Ad un certo livello di gravità dello stress, il tasso di aumento di HI coincide con quello normale, in quanto l'effetto positivo di inibizione dell'espansione fogliare è controbilanciato dall'effetto negativo della chiusura degli stomi. Man mano che lo stress si intensifica oltre questo livello, gli effetti complessivi divengono negativi.

Il modello AquaCrop richiede un numero relativamente ridotto di dati di input di facile determinazione. Tali dati sono organizzati in quattro moduli fondamentali riguardanti le condizioni climatiche, la coltura, il suolo e la gestione aziendale secondo lo schema ripotato in Figura 2. Per ogni giorno del periodo di simulazione, AquaCrop richiede la temperatura minima e massima dell'aria, la precipitazione e l'evapotraspirazione di riferimento ( $ET_0$ ) come misura della domanda evaporativa dell'atmosfera. Per il calcolo di  $ET_0$  secondo l'equazione di Penman-Monteith (Allen et al., 1998) deve essere fornito un set completo di dati meteorologici giornalieri comprendente la radiazione solare, la temperatura minima e massima dell'aria, la velocità del vento e l'umidità. Inoltre, deve essere fornita la concentrazione media annuale di anidride carbonica ( $CO_2$ ) nell'atmosfera.



**Figura 3.3.2.** - Dati di input necessari per simulazioni con il modello AquaCrop. Lo schema è derivato da Steduto et al. (2012).  
**Figure 3.3.2.** - Input data required for the simulations with the AquaCrop model. The scheme is derived from Steduto et al. (2012).

AquaCrop utilizza un numero relativamente ridotto di parametri per caratterizzare la coltura. L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura ha calibrato i parametri caratteristici di molte colture agricole e li fornisce come valori di default nei file delle colture presenti nel database di AquaCrop. I parametri vengono distinti in due categorie: conservativi o dipendenti dalla cultivar e dalle condizioni (Steduto et al., 2012).

I parametri conservativi non variano nel tempo, con le pratiche di gestione, il clima o la posizione geografica. In generale i parametri conservativi non

richiedono alcun adattamento alle condizioni locali o per le comuni cultivar, e possono essere utilizzati come tali nelle simulazioni. Tuttavia un piccolo adeguamento di un valore calibrato per un parametro conservativo può essere apportato solo se l'adattamento si basa su dati sperimentali di alta qualità. I parametri dipendenti dalla condizione e dalla cultivar sono generalmente variabili con le particolari cultivar e situazioni. Esempi ne sono la durata del ciclo e la fenologia della cultivar.

I valori raccomandati dalla FAO (2018c) per i parametri culturali sono raccolti in tabelle dedicate alle

principali colture e rappresentano stime ottenute da dati sperimentali in fase di calibrazione/validazione del modello.

Occorre infine sottolineare che, affinché gli effetti indotti dalla temperatura sui processi colturali chiave possano essere messi in conto dal modello, AquaCrop deve essere eseguito in modalità GDD.

Il profilo di suolo considerato per le simulazioni può essere costituito da un massimo di cinque orizzonti di profondità variabile. I dati necessari per la caratterizzazione del suolo includono: contenuto volumetrico di acqua a saturazione, capacità di campo (FC), punto di avvizzimento permanente (PWP) e conducibilità idraulica alla saturazione (Ksat), per ciascuno strato della zona delle radici. Nella definizione di tali parametri possono essere utilizzate informazioni precise derivanti da analisi dei suoli oppure valori indicativi forniti da AquaCrop per varie classi di tessitura del suolo o ottenute dall'impiego di funzioni di pedotrasferimento. Poiché queste funzioni dipendono solo dalla classe tessiturale e non tengono conto dello stato di aggregazione del suolo, i valori da esse forniti possono essere considerati solo come stime approssimative. È inoltre necessario specificare il contenuto d'acqua e la salinità degli strati del profilo di suolo considerato all'inizio del periodo di simulazione (condizioni iniziali). Gli effetti indotti dalla presenza di una falda poco profonda possono essere inclusi nella modellazione con AquaCrop fornendo la serie temporale della profondità dell'acqua dal piano campagna e della sua conducibilità elettrica rilevati durante la stagione colturale in piezometri di monitoraggio.

Le pratiche di gestione aziendale si suddividono in gestione del campo e gestione dell'irrigazione. Le pratiche di gestione del campo comprendono l'indicazione del livello di fertilità del suolo, della eventuale copertura relativa di infestanti e delle pratiche adottate con effetti sul bilancio idrico del suolo, come la pacciamatura per ridurre l'evaporazione del suolo, i rialzi di terreno per immagazzinare acqua sul campo e pratiche conservative come l'aratura per la riduzione del deflusso superficiale. Il livello di fertilità del suolo può variare da non limitante a povero, con effetti sul tasso di sviluppo della copertura fogliare, sulla massima copertura fogliare raggiunta, sulla senescenza e sulla produttività idrica della coltura WP\*. Nella parte dedicata alla gestione dell'irrigazione occorre specificare se la coltura viene irrigata oppure no. Nel caso di irrigazione, occorre indicare il metodo utilizzato (irrigatore, irrigazione di superficie o a goccia), la frazione di superficie bagnata e, per ogni evento applicato, la quantità di acqua utilizzata, la sua qualità (conducibilità elettrica) ed il momento dell'intervento. Il modello fornisce anche opzioni per valutare il fabbisogno netto di irrigazione e generare consigli irrigui basati su criteri di tempo e quantità specificati, consentendo di mettere a confronto diverse strategie irrigue.



**3.4. -** Calibration of the AquaCrop model on maize was performed by using the measurements of the wireless sensor network and the information derived from the monitoring of the experimental fields during the 2018 and 2019 growing seasons as model input data. The predicted output values were compared with the observed canopy cover and dry above ground biomass at the monitoring points in the experimental fields. AquaCrop model predictions of maize canopy cover and biomass resulted in good agreement with the observed data.

### 3.4 - LA CALIBRAZIONE DI AQUACROP SU MAIS

Il campo considerato per la calibrazione del modello AquaCrop durante la stagione agricola 2018, rispettando

l'avvicendamento culturale previsto dalla cooperativa agricola Agrisfera, è parte dello squadro 1 Bio-Marcabò rappresentato in Figura 1 bordato da una linea di colore magenta.



**Figura 3.4.1. -** Area di studio, rete wireless di sensori e localizzazione dei campi oggetto di monitoraggio nel 2018 (bordo magenta) e nel 2019 (bordo giallo), da Masina et al. (2020).

**Figure 3.4.1. -** Study area, wireless sensor network and location of the fields monitored in 2018 (magenta boundary) and 2019 (yellow boundary), from Masina et al. (2020).



**Figura 3.4.2.** - Carta storica del territorio ferrarese del 1814 derivata da <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/CST1H5/index.html>.

**Figure 3.4.2.** - Historical map of 1814 of the Ferrara territory derived from <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/CST1H5/index.html>.

Il campo si trova nella parte più bassa dell'area. Dall'analisi del DTM derivato dai dati Lidar del 2010 contenuti nel Geoportale Nazionale (<http://www.pcn.minambiente.it/mattm/>), il campo presenta un'elevazione compresa tra circa 30 cm sotto il livello medio del mare nella parte più meridionale e circa 130 cm sotto il livello medio del mare al margine Nord del campo. Come si osserva dallo stralcio della Carta storica del territorio ferrarese del 1814 (Carta Napoleonica) riportato in Figura 2, il campo è localizzato in corrispondenza di un'area anticamente occupata da paludi salmastre fino ai primi anni del Novecento, quando venne completata la definitiva bonifica delle valli Marchebò e Menabò, immediatamente a sud del Reno. La tessitura del suolo in quest'area, desunta anche dalla Carta Geologica d'Italia, è da limo-argillosa ad argillo-limoso.

In corrispondenza dei nodi P02 e P07 di Figura 1, si trovano le stazioni meteorologiche installate nel 2017 nell'ambito del progetto Agrowetlands II. Dalla

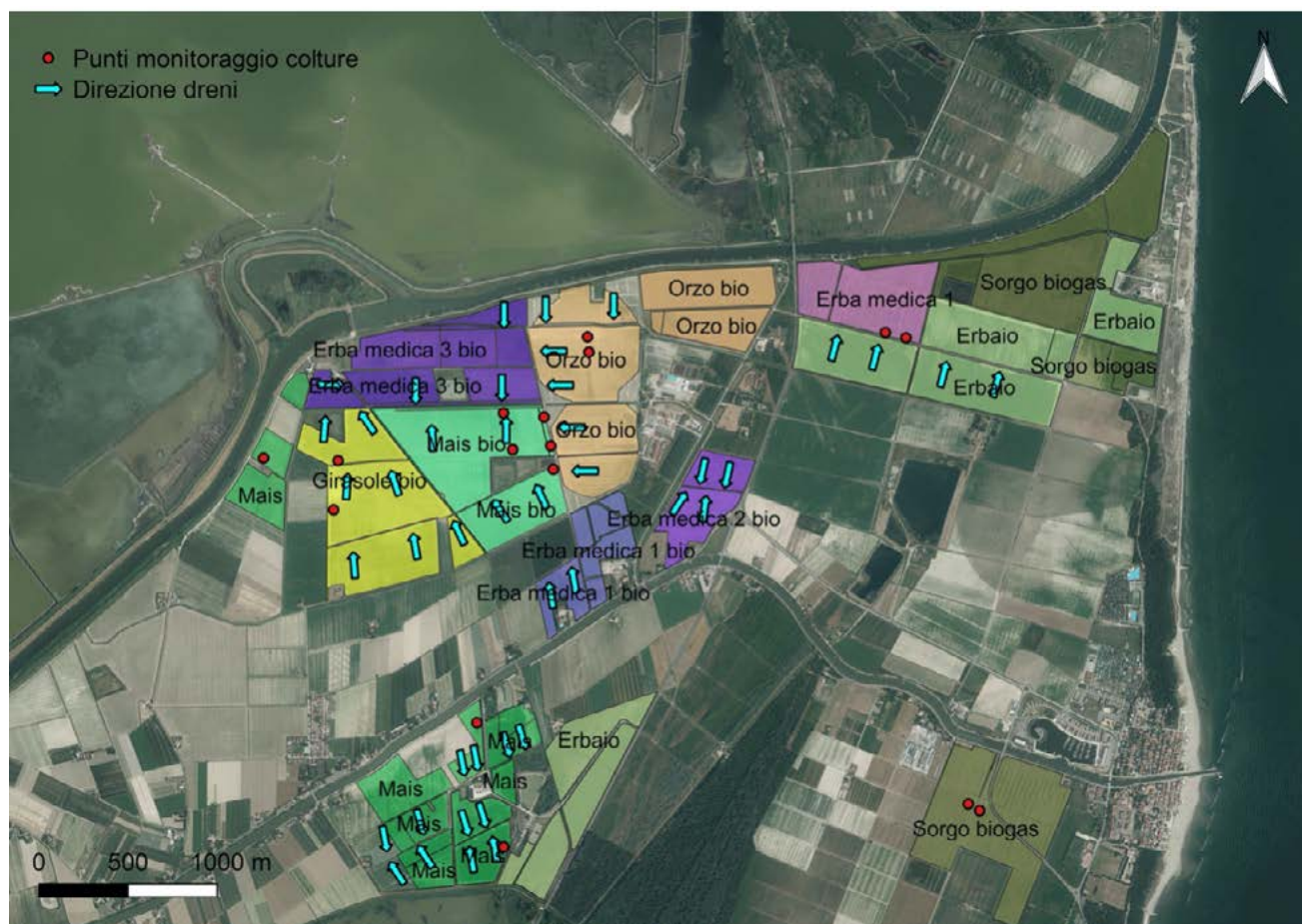
stazione P02, più vicina al campo di studio, sono state derivate le condizioni meteorologiche con risoluzione giornaliera necessarie per la simulazione con AquaCrop: temperatura dell'aria minima e massima, umidità minima e massima, vento sfilato, radiazione solare incidente e precipitazione cumulata. Buchi nei dati di durata superiore ad alcune ore sono stati riempiti facendo uso delle registrazioni derivate dalla stazione P07. Il valore medio annuale di anidride carbonica nell'aria per il 2017 (essendo la simulazione numerica eseguita durante la stessa annata agricola) è stato ottenuto dalle misurazioni condotte dall'Aeronautica Militare presso l'Osservatorio meteorologico di Monte Cimone, pubblicate online dal World Data Centre for Greenhouse Gases.

Analizzando la fotografia aerea del 1 Giugno 2003 inclusa nell'archivio del software Google Earth, si osserva come il campo oggetto di studio fosse originariamente drenato mediante scoline poste ad una distanza di circa 25 m l'una dall'altra,



riflettendo la bassa permeabilità dei suoli dell'area. Attualmente il campo risulta dotato di drenaggio sotterraneo, realizzato mediante tubi forati in PVC posti ad una di profondità di 90 cm, con interasse di 10 m e pendenza di 1:1000 per l'allontanamento delle acque in eccesso dal terreno agricolo verso il canale secondario a Nord, vedi Figura 3. I tubi

di drenaggio sotterraneo, ove presenti, di fatto separano il terreno agricolo superiore, da cui l'acqua eccedente la capacità di campo percola verso il basso trascinando sali e nutrienti solubili, dagli strati inferiori dove normalmente è presente acqua salmastra o salata (Lamberti et al., 2018; Masina et al., 2019).



**Figura 3.4.3.** - Disposizione dei dreni (freccette azzurre), colture praticate nei campi e punti ove è stato condotto il rilievo a terra (punto rosso) nel 2018.

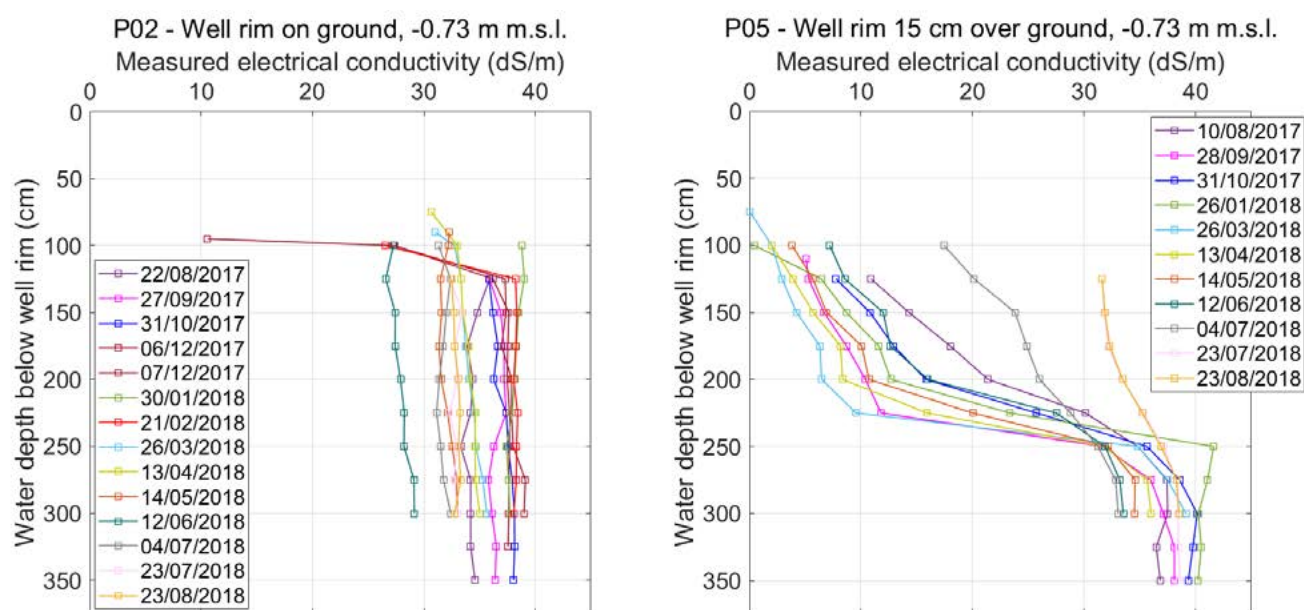
**Figure 3.4.3.** - Arrangement of drains (blue arrows), cultivated crops and points where the ground survey was conducted (red dot) in 2018.

I valori di livello e conducibilità elettrica dell'acqua di falda necessari per la simulazione con il modello AquaCrop sono stati desunti dall'analisi dei rilievi di distribuzione verticale della salinità, eseguiti con cadenza circa mensile nel periodo Agosto 2017-Agosto 2018 nei piezometri P02 e P05 più vicini al campo oggetto di studio (Figura 4). Dai rilievi emerge la presenza nella falda di una evidente

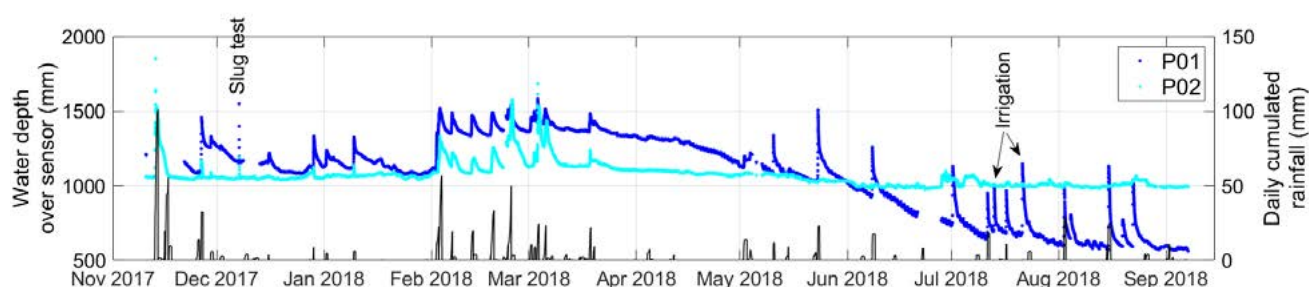
stratificazione che separa le acque dolci di origine pluviale o irrigua dalla sottostante acqua salata. L'irrigazione con acqua dolce praticata durante il periodo estivo consente di deprimere l'interfaccia fra acqua dolce ed acqua salata. Inoltre, laddove la falda salmastra tende a risalire, i dreni sotterranei ne stabilizzano il livello attorno alla loro quota, allontanando l'acqua di risalita e costituendo una

stabile barriera idrodinamica fra le acque dolci presenti nel suolo agrario e le acque salate di falda. In altre zone meno alimentate dal basso, l'interfaccia si sposta verticalmente e/o la falda scende anche al di sotto della quota dei dreni. Nel grafico di Figura 5 viene mostrato l'andamento nel tempo del livello misurato in continuo dai sensori installati all'interno dei piezometri P01 e P02, posti rispettivamente in un campo non drenato e drenato, da cui emerge

chiaramente l'effetto stabilizzante esercitato dal drenaggio sotterraneo. Oltre alle oscillazioni del livello di falda dovute ad eventi di precipitazione e di irrigazione, nei campi in cui sono presenti colture molto idroesigenti (es. mais) risultano chiaramente visibili anche piccole oscillazioni giornaliere di livello (~3 cm) coerenti con la traspirazione della coltura, percepibili ad es. nel tracciato P01 nei mesi di Giugno e Luglio in particolare.



**Figura 3.4.4.** - Distribuzione verticale della conducibilità elettrica rilevata nei piezometri P02 e P05, da Lamberti et al. (2018).  
**Figure 3.4.4.** - Vertical distribution of the electrical conductivity detected in the P02 and P05 piezometers, from Lamberti et al. (2018).



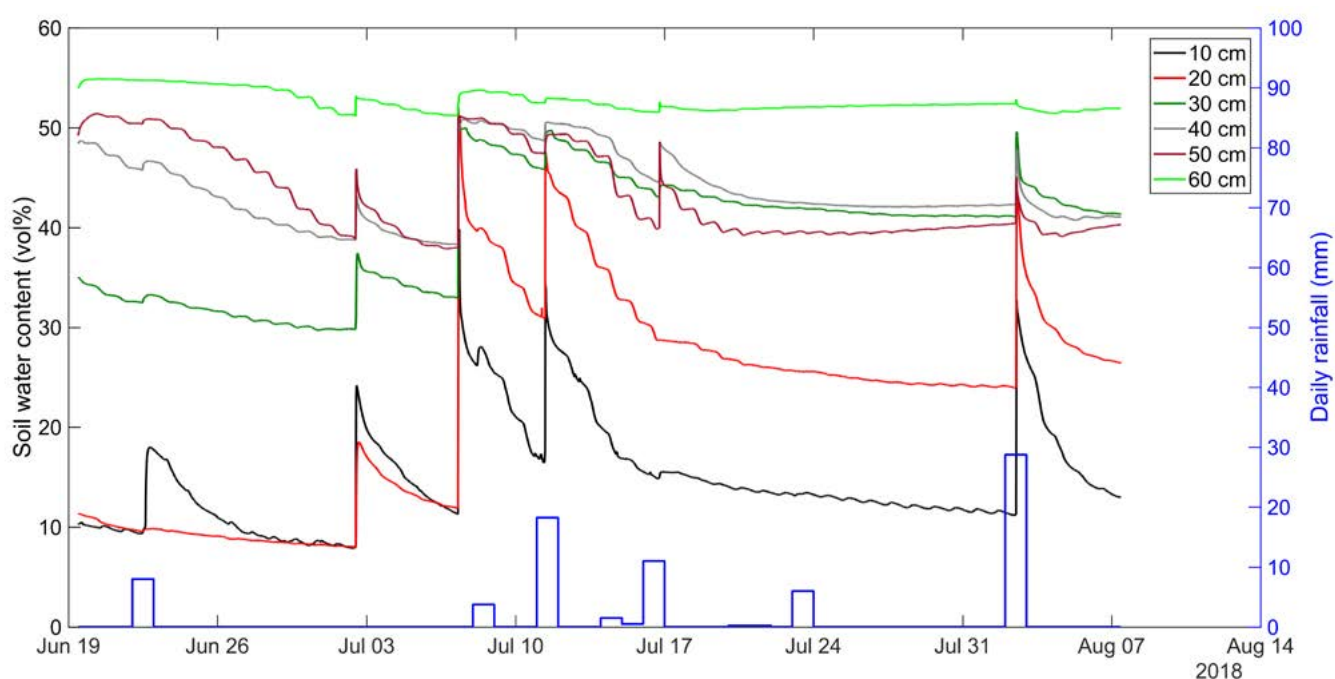
**Figura 3.4.5.** - Andamento temporale del livello di falda misurato in continuo nei piezometri P01 e P02, posti rispettivamente in un campo non drenato e drenato, in relazione alle precipitazioni misurate alla stazione meteo P02, da Lamberti et al. (2018).  
**Figure 3.4.5.** - Groundwater level measured continuously over time in the piezometers P01 and P02, placed respectively in a field without and with subsurface drainage pipes, in relation to the daily cumulated rainfall recorded at the weather station P02, from Lamberti et al. (2018).



Umidità e conducibilità elettrica del suolo durante la stagione agricola 2018 sono state monitorate mediante un sensore GS3 permanente (nodo S03 in Figura 1) posto ad una profondità di circa 50 cm dal piano campagna ed una sonda Sentek temporanea di 60 cm di lunghezza con sensori fissati ad intervalli di 10 cm, appositamente installati sul lato Sud-Est del campo oggetto di studio per seguirne con continuità l'evoluzione temporale. La serie dei valori di umidità rilevati dalla sonda Sentek, riportata in Figura 6, mostra in media un aumento dell'umidità del suolo al crescere della profondità con perturbazioni indotte da eventi di precipitazione o di irrigazione.

Due eccezioni risultano evidenti rispetto al trend generale:

- 1) per effetto della presenza di crepe nel suolo argilloso, l'acqua può percolare negli strati più profondi senza incrementare l'umidità degli strati più superficiali;
- 2) nel mese di Luglio l'acqua di irrigazione e le precipitazioni vengono assorbite dagli strati superficiali generando un'inversione dell'usuale gradiente di umidità: ovvero, l'umidità a 40 cm risulta più elevata dell'umidità a 50 cm.



**Figura 3.4.6.** - Andamento dell'umidità nel terreno rilevato dai sensori della sonda Sentek alle diverse profondità e precipitazione cumulata giornaliera misurata alla stazione meteo P02, da Masina et al. (2019).

**Figure 3.4.6.** - Soil water content recorded at different depths by the Sentek probe and cumulative daily precipitation measured at the P02 weather station, from Masina et al. (2019).

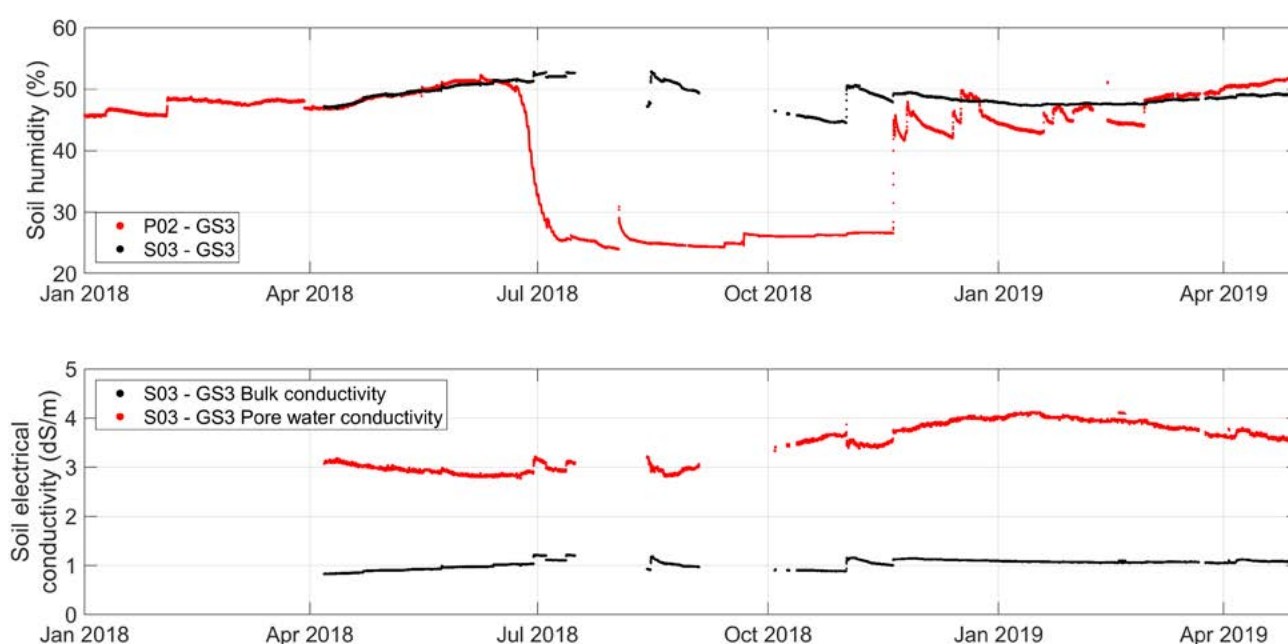
Un profilo di suolo costituito da quattro orizzonti argilloso-limosi sovrapposti (silty clay secondo la classificazione USDA) di spessore 10, 20, 30 e 60 cm è stato considerato nella simulazione con il modello AquaCrop. Una stima preliminare delle caratteristiche idrauliche dei quattro strati, contenuto d'acqua alla saturazione, capacità di campo, punto di avvizzimento e conducibilità

idraulica alla saturazione, è stata ottenuta mediante il software Soil Water Characteristics sviluppato da Saxton et al. (2006) sulla base dei dati di tessitura e contenuto in sostanza organica forniti dalla cooperativa Agrisfera, e tenendo conto del grado di compattazione del terreno indotto dalle lavorazioni praticate e della salinità del suolo misurata dal sensore GS3 in corrispondenza del nodo S03. I valori

ottenuti sono stati poi aggiustati sulla base delle registrazioni di umidità ad intervalli di 10 cm della sonda Sentek, per meglio rappresentare la porosità indotta dall'aratura alle diverse profondità ed i suoi effetti sulla conducibilità idraulica e contenuto d'acqua a saturazione.

L'inizio della simulazione è stato fissato al 1 Aprile 2018 e le condizioni iniziali sono state derivate per

il terzo orizzonte dalle registrazioni del sensore S03 (Figura 3.4.7), poi estese sulla verticale secondo un normale gradiente. L'avvio della simulazione quaranta giorni prima della semina in campo consente di ridurre l'impatto del gradiente iniziale una volta raggiunta la fase rilevante della simulazione caratterizzata dalla crescita e dallo sviluppo della coltura.



**Figura 3.4.7.** - Umidità del suolo rilevata in corrispondenza dei nodi P02 e S03 (grafico in alto) e conducibilità elettrica in S03 (in basso) a circa 50 cm di profondità. Si osserva come l'umidità misurata dai sensori di suolo S03 e P02, posti rispettivamente in un campo irrigato coltivato con mais durante l'annata agricola 2018 ed in uno non irrigato coltivato con girasole, non differisca significativamente prima della stagione estiva e degli interventi irrigui in questa eseguiti.

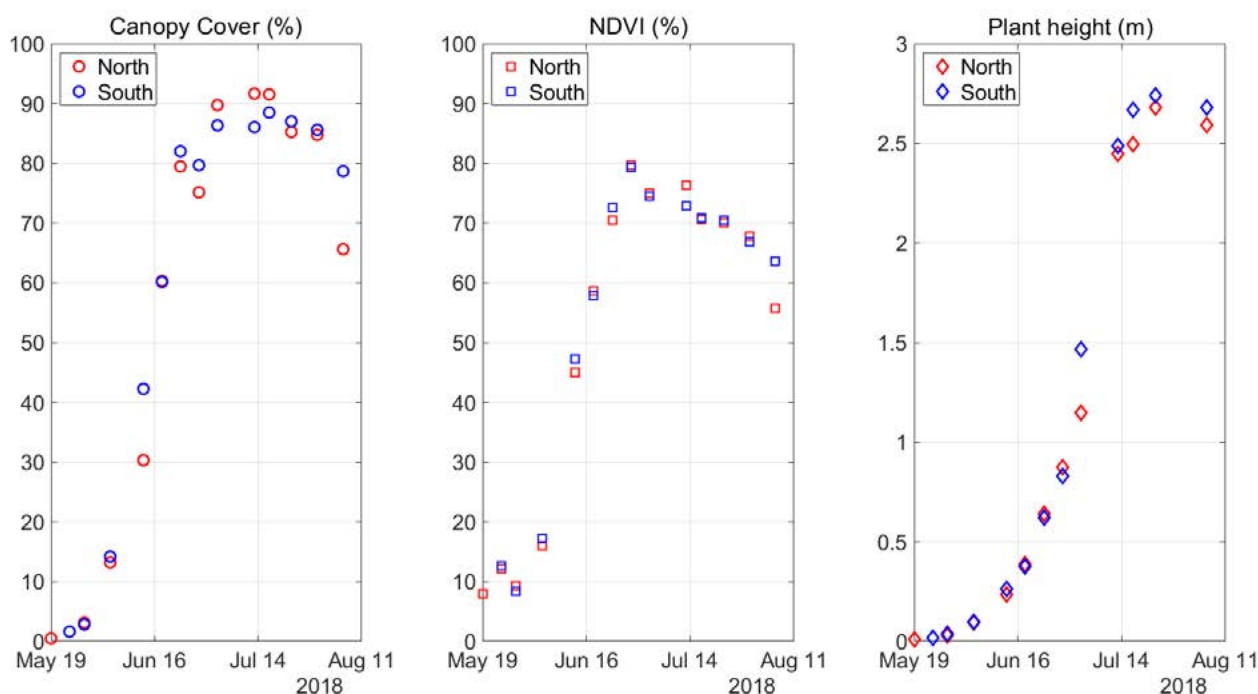
**Figure 3.4.7.** - Soil humidity measured at nodes P02 and S03 (upper plot) and soil electrical conductivity from sensor S03 (bottom) at a depth of about 50 cm. It is observed that the humidity measured by the soil sensors S03 and P02, located respectively in an irrigated field cultivated with corn and in a rainfed field cultivated with sunflower during the 2018 growing season, does not differ significantly before the summer season and irrigation interventions.

Nel campo oggetto di sperimentazione, gestito dalla cooperativa agricola Agrisfera seguendo il disciplinare che regola l'agricoltura biologica, è stato seminato mais Krups della Società Italiana Sementi (S. Lazzaro, Bologna, Italia) il 10 Maggio 2018, con una spaziatura di 15 cm sulla fila e 75 cm tra le file. Questo mais di classe FAO 600 presenta un ciclo medio di 125 giorni. Nell'impostazione del modulo relativo alla coltura per la simulazione con il modello AquaCrop sono state tenute in considerazione

le indicazioni fornite dalla ditta sementiera sul numero di gradi giorno utili per il raggiungimento dell'inizio della fioritura, della maturazione cerosa e della maturazione fisiologica. Una temperatura di base di 10°C ed un valore limite massimo di 30°C sono stati adottati come soglie termiche per il mais. Una densità media effettiva di 7.8 piante/m<sup>2</sup> è stata valutata dalle osservazioni in campo ed utilizzata nella modellazione. È stata inoltre indicata in 1 m la massima profondità raggiunta

dalle radici, e specificata la loro distribuzione nel profilo di suolo come uniforme (25% in ciascuno dei quattro orizzonti considerati), sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi delle carote estratte in campo alla fioritura, momento in cui si può ritenere conclusa la crescita delle radici. Per i coefficienti di stress si sono mantenuti inalterati i valori di default indicati da AquaCrop. Rilievi in campo sono stati eseguiti con cadenza circa settimanale per verificare lo sviluppo fenologico del mais, valutando altezza, numero di foglie verdi e gialle o secche e numero di nodi per un prefissato numero di piante. Prelievi di campioni rappresentativi delle piante in campo sono stati inoltre eseguiti a partire dalla fase di levata ed essiccati in forno per determinarne la quantità di sostanza secca. Valori di canopy cover necessari per la calibrazione del modello sono stati ottenuti mediante fotografie scattate in campo e successivamente processate con la app Canopeo

per Matlab sviluppata da Patrignani and Ochsner (2015). Valori di NDVI sono stati invece ottenuti mediante l'impiego di un GreenSeeker. Lo sviluppo e la maturazione cerosa del mais nell'annata 2018 hanno seguito quasi esattamente i tempi indicati dalla relativa scheda del prodotto distribuita dalla ditta sementiera. I tre grafici riportati in Figura 3.4.8 mostrano l'evoluzione temporale della canopy cover, dell'indice NDVI e dell'altezza delle piante rilevati in due punti di monitoraggio localizzati in prossimità dei lati Nord e Sud del campo, tra il 10 Maggio e l'11 Agosto 2018, giorno in cui è avvenuta la trinciatura del mais allo stadio ceroso per la produzione di insilato. NDVI e canopy cover mostrano valori simili durante la fase di sviluppo vegetativo fino alla fioritura, mentre dopo la fioritura entrambi rimangono pressoché costanti, non consentendo più di descrivere le successive fasi riproduttiva e di maturazione.

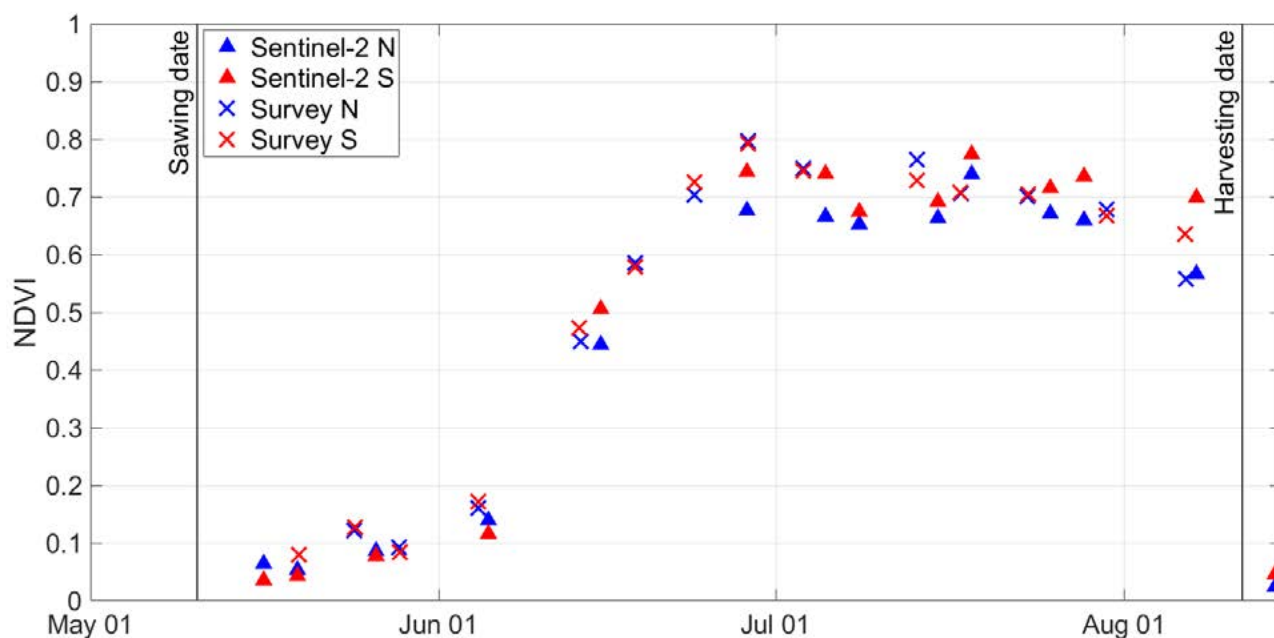


**Figura 3.4.8.** - Canopy cover, indice NDVI e altezza delle piante rilevati in due punti di monitoraggio localizzati in prossimità dei lati Nord e Sud del campo oggetto di studio.

**Figure 3.4.8.** - Canopy cover, NDVI and plant height measured in two monitoring points of the study field at the north and south margins.

La Figura 9 mette a confronto l'evoluzione temporale dell'indice NDVI ottenuta dai dati dei rilievi in campo con quella derivata dalle immagini Sentinel-2 dell'EO

Data Service (<http://www.eodataservice.org/>) nei due punti di rilievo, Nord e Sud, evidenziandone la buona corrispondenza.



**Figura 3.4.9.** - Evoluzione temporale dell'indice NDVI nei due punti di monitoraggio, lato Nord e Sud, dai valori ottenuti dai rilievi in campo e quelli derivati dalle immagini Sentinel-2 dell'EO Data Service (<http://www.eodataservice.org/>) in corrispondenza delle stesse posizioni planimetriche, da Masina et al. (2019).

**Figure 3.4.9.** - Time evolution of NDVI at the survey points, north and south margins, obtained from ground observations and Sentinel 2 data derived from the EO Data Service (<http://www.eodataservice.org/>) at the same positions, from Masina et al. (2019).

Le simulazioni con AquaCrop sono state realizzate considerando le irrigazioni effettive eseguite sul mais Krups dalla cooperativa Agrisfera: 45 mm sono stati distribuiti il 20 Giugno, 50 mm il 10 Luglio e 40 mm il 19 Luglio, seguendo i consigli sul momento di intervento e sul volume di adacquata forniti da Irrinet, il servizio di assistenza irrigua via web sviluppato dal CER. L'irrigazione è stata eseguita con rotolone lungo direttrici Nord-Sud prelevando l'acqua dal canale secondario sul lato Nord del campo, il cui livello è stato innalzato a partire dal 18 Giugno mediante l'inserimento di una paratoia, rimossa poi ad inizio Agosto quando, stante lo stadio di maturazione raggiunto dal mais, non erano più necessari ulteriori interventi irrigui. Per tutte e tre le irrigazioni è stata utilizzata acqua di buona qualità (0.7 dS/m) proveniente dalla canaletta Mandriole.

A partire dal 18 Giugno, quando è stata inserita la paratoia nel suddetto canale, è ragionevole ipotizzare che l'innalzamento del livello dell'acqua abbia allagato i tubi di drenaggio almeno nella parte più settentrionale del campo, adiacente al canale secondario. Per tenere conto di tale effetto, per il campo in esame sono state simulate due diverse condizioni:

- falda salmastra con livello variabile e salinità (10.5 dS/m) come rilevati al piezometro P02,
- considerando, per tutto il periodo in cui è rimasta infissa la paratoia, una lente di acqua di buona qualità ad 80 cm di profondità, corrispondente alla quota dei dreni.

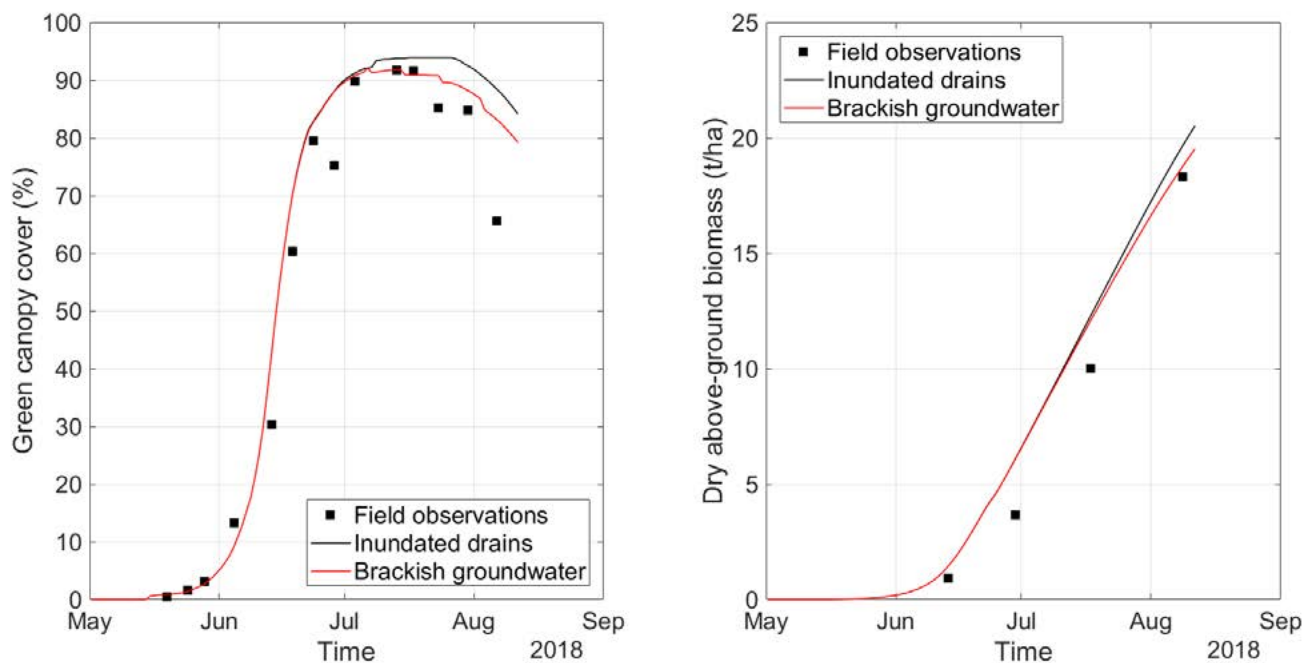
Dall'analisi dei risultati di una preliminare simulazione in fase di calibrazione, è risultato inoltre opportuno modificare i valori di default attribuiti in



AquaCrop ai parametri “canopy cover per seedling” e “minimum effective rooting depth”, rispettivamente in 8 cm<sup>2</sup>/pianta e 25 cm, al fine di rappresentare adeguatamente lo sviluppo osservato in campo. I risultati delle simulazioni con il modello finale ca-

librato riportati in Figura 10 mostrano un ottimo accordo con le osservazioni di campo, sia in termini di canopy cover che di biomassa secca prodotta per ettaro.

L'andamento simulato nel tempo del contenuto d'ac-

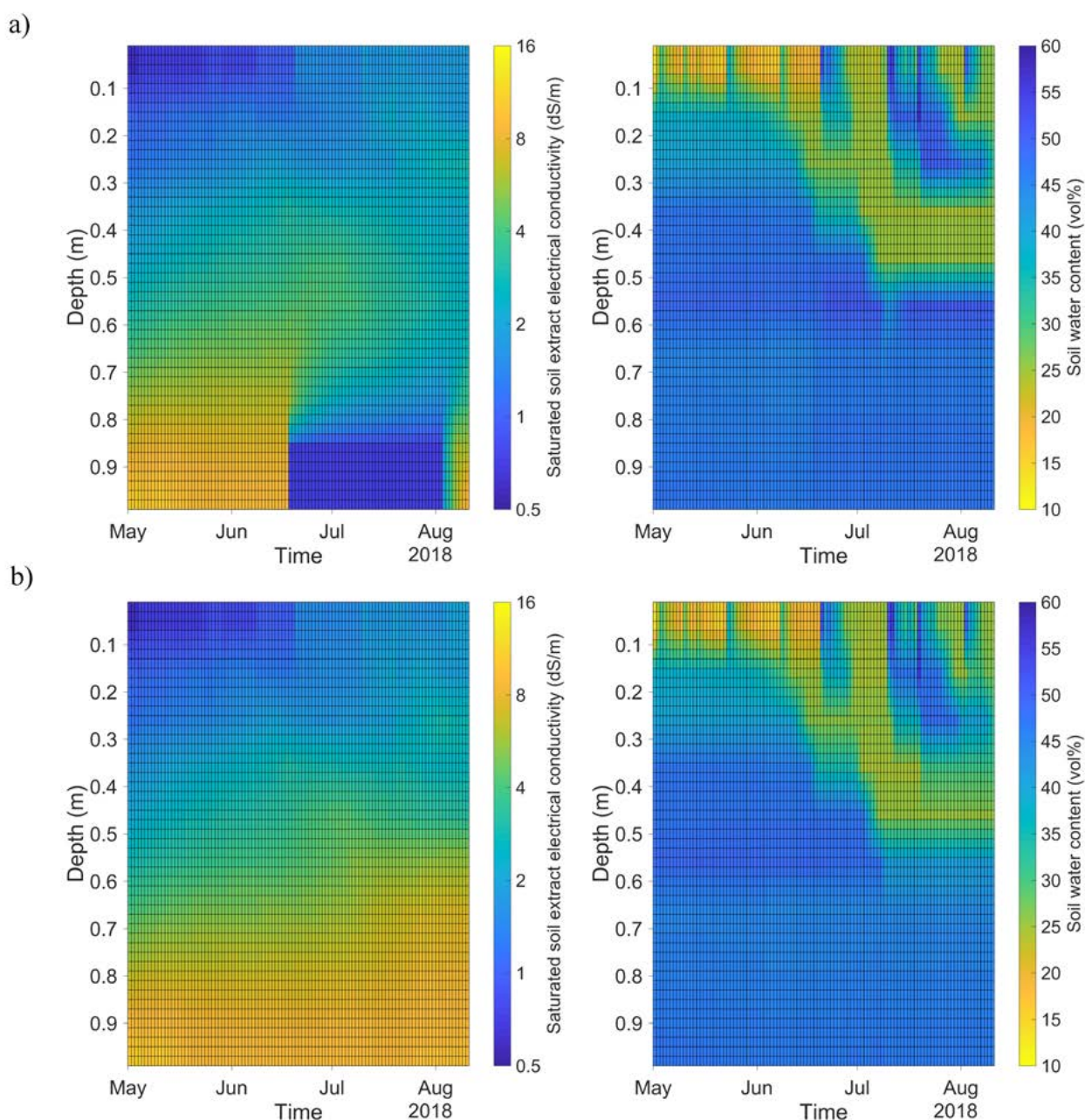


**Figura 3.4.10.** - Confronto in termini di canopy cover e biomassa secca fra i valori ottenuti dai rilievi in campo al margine settentrionale ed i risultati della simulazione con AquaCrop per i due casi considerati di falda salmastra e dreni allagati fra il 18 Giugno e il 2 Agosto 2018, da Masina et al. (2019).

**Figure 3.4.10.** - Comparison in terms of canopy cover and dry above-ground biomass between field observations at the north monitoring point and AquaCrop simulation results for the two considered cases, brackish groundwater and inundated drains between 18 June and 2 August 2018, from Masina et al. (2019).

qua nel suolo e della conducibilità elettrica in pasta satura è mostrato rispettivamente nei grafici di destra e sinistra di Figura 11. Si osserva come, in assenza di dreni allagati (situazione b), si verifichi una significativa risalita del sale verso gli strati superiori durante la stagione colturale. Dai grafici di destra è inoltre possibile osservare come il modello simuli correttamente la distribuzione verticale dell'umidità

nel suolo con andamento crescente verso il basso ed anche l'inversione del gradiente normale di umidità nel periodo irriguo estivo, inversione osservata anche alla sonda Sentek (Figura 6). La percolazione di acqua piovana e irrigua rimane però limitata agli strati superficiali ed il sale non viene completamente rimosso dal profilo di suolo.



**Figura 3.4.11.** - Andamento nel tempo e con la profondità della salinità e del contenuto d'acqua nel caso di a) dreni allagati fra il 18 Giugno e il 2 Agosto e b) falda salmastra considerando le irrigazioni effettive eseguite nel 2018, da Masina et al. (2019).

**Figure 3.4.11.** - Time-depth distribution of salinity and water content in the case of a) inundated drains between 18 June and 2 August and b) brackish groundwater considering the actual 2018 irrigation scenario, from Masina et al. (2019).

Il campo oggetto di monitoraggio in modalità close-loop durante la stagione agricola 2019 è lo squadro 5 Bio-Marcabò rappresentato in Figura 1 bordato da una linea di colore giallo e localizzato immediatamente a Sud del Reno, ad una distanza di circa 3 km dalla costa. A fine estate 2018 il campo è stato dotato di un sistema di drenaggio sotterraneo costi-

tuito da tubi forati in PVC posti ad una profondità di 80 cm e distanziati 10 m l'uno dall'altro. La tessitura del suolo è prevalentemente franco-argillosa (clay loam secondo la classificazione USDA), ma dall'analisi delle immagini storiche contenute in Google Earth e nel database della Regione Emilia-Romagna ([http://www.mokagis.it/html/applicazioni\\_mappe](http://www.mokagis.it/html/applicazioni_mappe).

asp) il campo risulta attraversato dal tracciato di antiche dune, soprattutto nelle porzioni Sud-Ovest e Sud-Est, a cui corrisponde un incremento della percentuale di sabbia anche negli strati più superficiali. Per la simulazione con il modello AquaCrop è stato considerato un profilo di suolo costituito da cinque orizzonti sovrapposti di spessore 10, 20, 30, 30 e 10 cm con caratteristiche idrauliche derivate in prima approssimazione dall'applicazione del software Soil Water Characteristics considerando le indicazioni di tessitura (franco-argillosa) e sostanza organica fornite da Agrisfera, nonché l'effetto dell'aratura e della salinità.

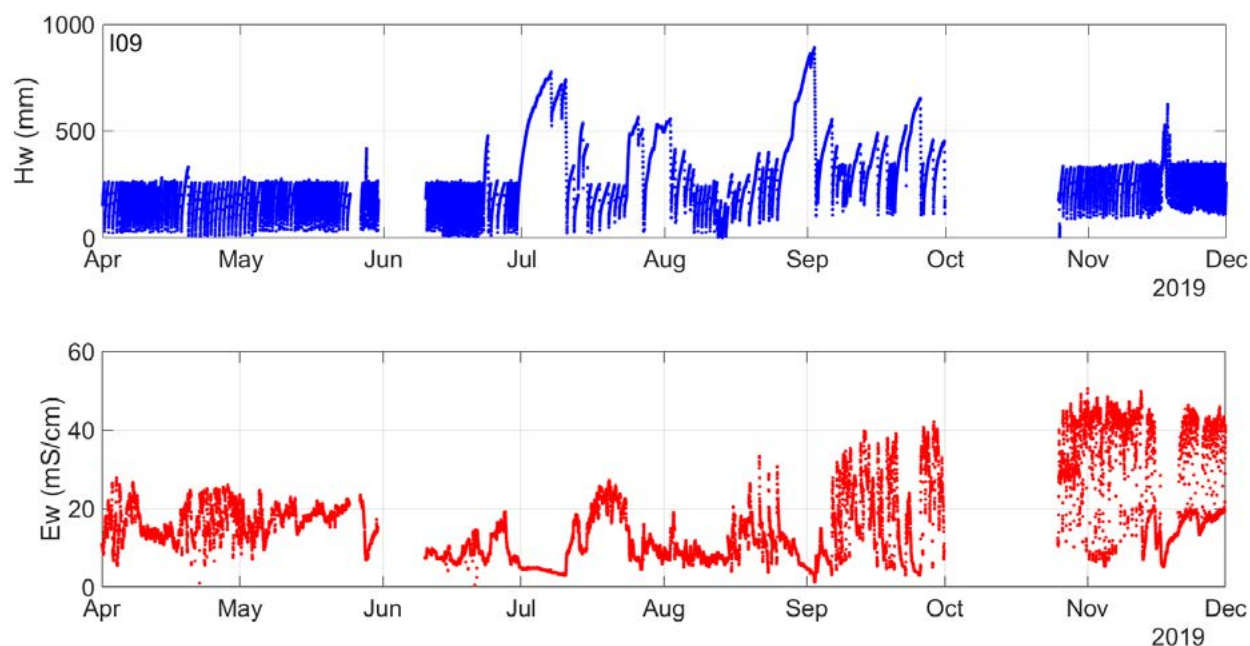
Le condizioni iniziali per la simulazione, espresse in termini di umidità e salinità per i vari strati del profilo di suolo, sono state derivate da un sensore GS3 posto ad una profondità di circa 55 cm dal piano campagna e da una sonda Sentek di 60 cm di lunghezza installati il 24 Maggio 2019 in corrispondenza del nodo P09 (Figura 1).

Al nodo P09 è inoltre presente un piezometro dotato di un sensore CTD10 per la misura in continuo del livello e della conducibilità elettrica dell'acqua

di falda. Dai rilievi della distribuzione verticale della conducibilità elettrica dell'acqua di falda condotti nel corso dell'intera stagione colturale sono stati derivati i valori necessari per le simulazioni con il modello AquaCrop.

Dalla stazione P02, meno influenzata dalle brezze marine, sono state derivate le condizioni meteorologiche con risoluzione giornaliera necessarie per la simulazione, riempiendo i buchi nei dati di durata superiore ad alcune ore con le registrazioni della stazione P07. Per le simulazioni è stato inoltre considerato il valore medio annuale di anidride carbonica nell'aria stimato per il 2018 da Cristofanelli et al. (2019).

Nel campo oggetto di sperimentazione il 23 Maggio 2019 è stato seminato dalla cooperativa agricola Agrisfera il mais P1517W di Pioneer, con una spaziatura di 15 cm sulla fila e 75 cm tra le file. Questo mais di classe FAO 600 presenta una durata media del ciclo di 128 giorni, con 822 gradi giorno utili (sopra i 10°C) necessari per la fioritura e 1572 per la maturazione fisiologica secondo le indicazioni del Vademecum 2018 di Pioneer (2017).



**Figura 3.4.12.** - Andamento nel tempo del livello (grafico in alto) e della conducibilità elettrica dell'acqua (in basso) nel canale Busona da cui è stata prelevata l'acqua di irrigazione nell'estate 2019; dati rilevati dal sensore I09 della rete wireless.

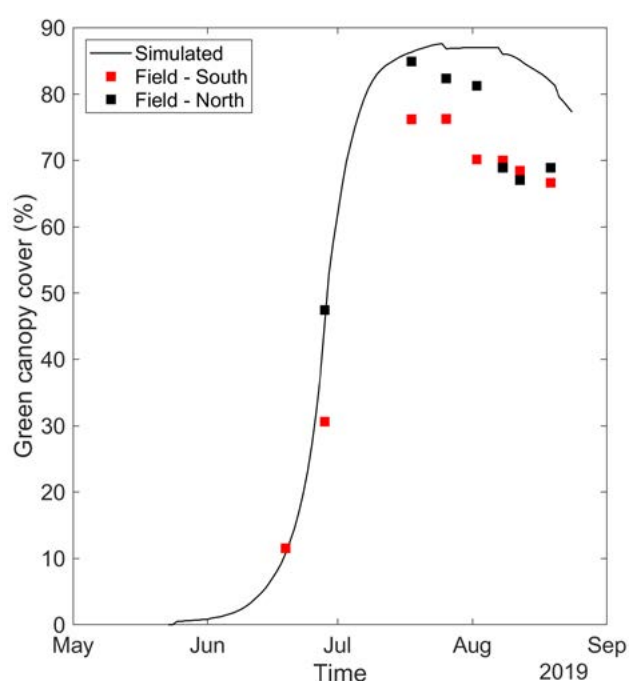
**Figure 3.4.12.** - Time pattern of level (upper plot) and water electrical conductivity (bottom plot) in the Busona channel from which the irrigation water was withdrawn in summer 2019; data measured by the sensor I09 of the wireless network.

Due interventi irrigui sono stati eseguiti dalla cooperativa Agrisfera con rotolone (45 mm il 5 Luglio e 50 mm il 1 Agosto), prelevando acqua dal canale Busona adiacente al lato Sud del campo. Dal grafico riportato in basso in Figura 12 si osserva come la salinità dell'acqua nel canale, misurata in continuo dal sensore I09 della rete wireless, sia normalmente molto elevata (15-20 dS/m) in quanto il canale scola i campi vicino al mare. Fanno eccezione i periodi, a partire da inizio Luglio, in cui il Consorzio di Bonifica invasa il canale di acqua dolce per l'irrigazione. Ne deriva comunque una fonte irrigua di qualità fortemente aleatoria e difficilmente prevedibile perché il Consorzio, quando teme il verificarsi di piogge intense, svasa i canali e si ripresenta immediatamente un'elevata salinità dell'acqua. Una densità media effettiva di 6.0 piante/m<sup>2</sup> è stata valutata da osservazioni puntuali in campo ed utilizzata nella modellazione. È stata inoltre indicata in 1 m la massima profondità raggiunta dalle radici e specificata la loro distribuzione nel profilo di suolo come uniforme. Rilievi in campo sono stati eseguiti per verificare lo sviluppo fenologico del mais, valutando altezza, numero di foglie verdi e gialle o secche e numero di nodi per un prefissato numero di piante. In concomitanza con i rilievi fenologici

sono state scattate fotografie per la determinazione della copertura fogliare verde e misurati valori di NDVI mediante l'impiego di un GreenSeeker. Campioni rappresentativi delle piante in campo sono stati raccolti il 19 Agosto in tre diversi punti del campo di sperimentazione ed essiccati in forno per determinarne la quantità di sostanza secca.

I risultati della simulazione con AquaCrop forniscono al 19 Agosto una stima di biomassa secca pari a 17.9 t/ha e al 24 Agosto, data in cui è avvenuta la trinciatura del mais per la produzione di insilato, 19.2 t/ha. Il valore simulato non differisce significativamente da quanto ottenuto mediamente dal rilievo di biomassa in campo, 22.4 t/ha con una deviazione standard di 4.7.

Anche in termini di canopy cover la simulazione fornisce un buon accordo con i valori osservati in campo durante la fase di sviluppo vegetativo e fino all'inizio della fioritura, in particolare sul lato Nord del campo, dove si è riscontrata una maggiore germinazione (Figura 13). Successivamente, si ha una riduzione del valore effettivo della canopy cover, così come dell'indice NDVI, per effetto della presenza dell'infiorescenza maschile nelle immagini rilevate dall'alto.



**Figura 3.4.13.** - Confronto in termini di canopy cover per il mais coltivato nel 2019 fra i risultati della simulazione con AquaCrop ed i valori ottenuti dai rilievi in campo in due diversi punti di monitoraggio, lato Nord e Sud rispetto allo stradello centrale che divide lo squadro in due parcelle.

**Figure 3.4.13.** - Comparison in terms of canopy cover for maize cultivated in 2019 between the AquaCrop simulation results and the values obtained from the field surveys in two different monitoring points, North and South of the dirt road that divides the field into two land parcels.



**3.5** - In this section the behaviour of the crop model, in particular soil characterisation, is verified by comparison with field observation of crop development. Two irrigation criteria are simulated, the historical one and that corresponding to AquaCrop default suggestion; criteria are compared and discussed leading the final approval of the farmer of the criterion.

### **3.5. - STAGIONE CULTURALE 2018: FORMULAZIONE DEL CONSIGLIO IRRIGUO IN OPEN LOOP**

I termini open loop e closed loop derivano dalla disciplina 'Controllo dei Sistemi' e il loro combinato è caratteristico delle procedure di messa a punto del sistema di controllo. Prima si caratterizza il comportamento del sistema in catena aperta, cioè senza applicare il controllo in retroazione, nel nostro caso senza modificare l'irrigazione abituale ma confrontandola soltanto con il consiglio irriguo suggerito. Poi, accertato che la chiusura della catena di controllo porta a raggiungere in forma stabile gli obiettivi voluti, si mette in atto la retroazione; nel nostro caso si mette in atto il consiglio irriguo avendo accertato la sua attendibilità.

In questo capitolo si descrive quindi la validazione e calibrazione del modello colturale adottato (modello del sistema), mentre nel capitolo successivo si descrive l'applicazione del sistema in un caso reale, inclusa la messa in atto del consiglio irriguo.

Ciò premesso per chiarire il contesto, si descrive qui in estrema sintesi quanto fatto.

Dopo aver verificato, con riferimento al campo di mais coltivato nella stagione 2017 nell'area servita dal pivot con centro al piezometro P05, che il software AquaCrop era idoneo per formulare consigli irrigui e fornire previsioni sulla resa della coltura, si è deciso in accordo con Agrisfera di effettuare una verifica annuale del sistema di supporto alle decisioni SMART AGROWETLANDS, ancora su una coltura di mais, ma su due varietà diverse.

Nel periodo della coltivazione è stato anche eseguito un monitoraggio settimanale dello sviluppo delle colture con osservazione degli stadi fenologici, dell'altezza della pianta e saltuariamente della biomassa aerea prodotta e della distribuzione delle radici a diverse profondità nel suolo.

In base a tutto questo, è stato messo a punto il modello della coltura, verificando:

- gli effetti dei parametri sul modello, selezionando i migliori valori di questi
- i criteri irrigui da adottare ed, in particolare, le soglie di umidità inferiore e superiore entro cui mantenere il contenuto d'acqua del suolo tramite l'irrigazione.

Agrisfera, l'agricoltore, non doveva attenersi al consiglio formulato, cosicché le irrigazioni effettive sono quelle suggerite da IRRINET. Le simulazioni, non dovendo fornire consigli da applicare, non sono state eseguite in tempo reale; si sono potuti così esaminare scenari diversi e confrontare i consigli irrigui di IRRINET con quelli formulati dal sistema SMART AGROWETLANDS, ma anche confrontare la resa simulata con quella riscontrata in campo.

Il campo prescelto è irrigabile con acqua di buona qualità prelevata dalla canaletta delle Mandriole, ma è collocato nella zona più bassa del comprensorio di studio con sottostante falda salata, la cui risalita è contenuta dal sistema di drenaggio del campo.

#### **Il campo sperimentale**

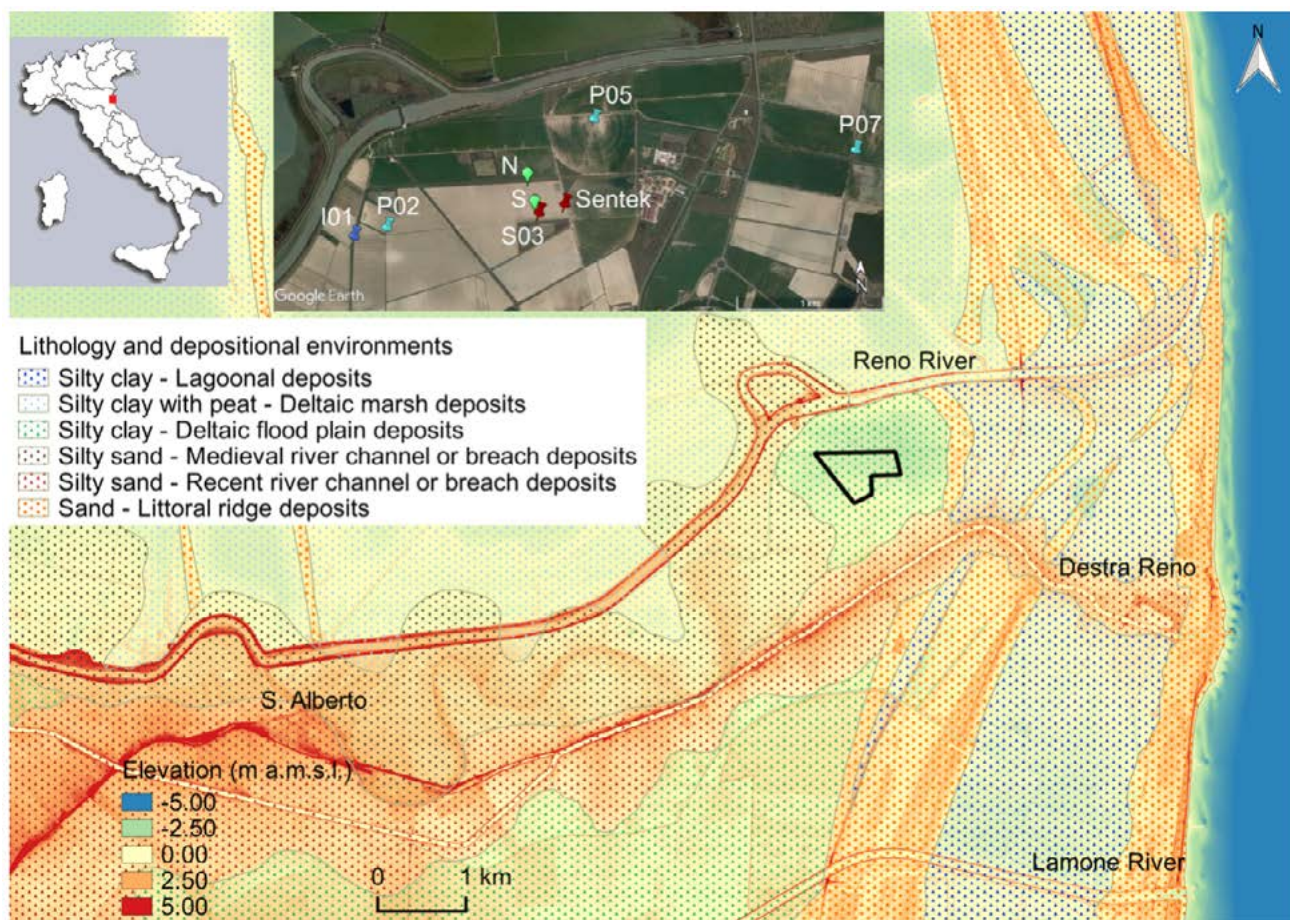
Il campo utilizzato per questa esperienza 2018 è rappresentato in figura #1, unitamente alla circostante area di studio.

Il campo è parte dell'azienda Marcabò Ovest, area destinata all'agricoltura biologica, ed è denominato squadra 1.b.

#### **Condizioni meteorologiche**

Nello specifico è stato predisposto ed aggiornato il file delle condizioni meteorologiche giornaliere a partire da 1 Aprile, cioè con un margine temporale sufficiente rispetto alla semina a consentire l'adeguamento delle condizioni di umidità del suolo alla specifica vicenda meteorologica dell'anno. Le condizioni meteorologiche comprendono:

- la temperatura massima e minima del giorno necessarie



**Figura 3.5.1.** - L'area di studio e il campo sperimentale 2018. Si vedono l'altimetria, la tessitura e la origine sedimentaria dei suoli; nel particolare in alto si vedono le stazioni P02 e P07, i sensori di monitoraggio dei suoli S03 e Sentek collocati nel campo. P05 denota un altro nodo della rete per il rilievo della falda e dei suoli. N e S denotano i punti dove è stato fatto il monitoraggio dello sviluppo della coltura.

**Figure 3.5.1.** - The study area and the experimental field 2018. You can see the altimetry, the texture and the sedimentary origin of the soils; in the detail above you can see the stations P02 and P07, the soil monitoring sensors S03 and Sentek located in the field. P05 denotes another node in the network for surveying the water table and soils. N and S denote the points where the monitoring of the development of the crop was made.

per valutare il progredire dei gradi-giorno, unità utilizzata per misurare la durata delle fasi fenologiche;

- la umidità minima e massima dell'aria, che meglio della umidità media, rappresentano il contenuto di vapore nell'aria,
- il vento sfilato nel giorno,
- la radiazione solare incidente a terra nel giorno,
- la precipitazione del giorno.

Tutti i dati sono desumibili dalle stazioni meteo della rete WSN; si è preferito di norma il dato della stazione P02 più vicina al campo in questione; i dati sono stati mutuati dalla stazione P07 solo per i pochi giorni di malfunzionamento della stazione preferita.

Di norma il file contiene i valori rilevati nell'anno fino al giorno corrente, quindi previsioni delle stesse grandezze per una o due settimane adeguatamente raccordate con le condizioni climatiche normali per il resto periodo di simulazione fino al raccolto.

Le simulazioni fatte a posteriori si basano sui soli dati osservati e hanno consentito di convalidare le capacità del modello indipendentemente dalla attendibilità delle previsioni meteo.

### Caratterizzazione del suolo

Le caratteristiche del suolo vengono fornite ad AquaCrop per strati di vario spessore per i quali viene indicato il

contenuto d'acqua:

- al punto di appassimento permanente (PWP, tensione dell'acqua nel suolo 15 bar),
- alla capacità di campo (tensione nel suolo 33 mb) e
- a saturazione,
- nonché la permeabilità del suolo in queste condizioni.

Questi valori possono essere valutati con software diversi in relazione alla tessitura (composizione percentuale in sabbia, limo e argilla), al contenuto in materia organica e alla compattazione o densità apparente dei suoli. A partire da questi valori, attraverso le formule di van Genuchten, sono valutate tensione e permeabilità dell'acqua nel suolo per qualunque grado di umidità. In particolare può essere valutata l'acqua facilmente utilizzabile (contenuta nei suoli a tensione minore di 1 bar), nonché l'effetto della salinità che, come conseguenza della pressione osmotica, riduce la capacità della pianta di assorbire acqua.

Nel nostro caso abbiamo usato le indicazioni di tessitura e materia organica fornite da Agrisfera, e si è assunto nei 30 cm superficiali il suolo sciolto per effetto dell'aratura, a compattazione normale fra i 30 e i 60 cm e denso a profondità maggiore. La conversione dalla tessitura alle caratteristiche idrauliche è stata effettuata con il software "Soil water characteristics" dell'USDA.

I valori così stimati hanno trovato un buon accordo globale con i rilievi effettuati dalla sonda Sentek dopo ogni irrigazione, sonda che rilevando ogni 15' la umidità del suolo ogni 10 cm fino alla profondità di 60 cm, consente di seguire il processo di umidificazione del terreno.

### **Caratterizzazione della falda**

Dalla falda l'acqua può risalire per capillarità nel suolo trasportando sale e nutrienti in essa contenuti, o dal suolo, umido oltre la capacità di campo, l'acqua può percolare in falda trasportando anche in questo caso sali e nutrienti.

Le caratteristiche dell'acqua di falda in superficie, quota e salinità, debbono essere date.

L'area di studio, azienda Marcabò Ovest, è una zona da questo punto di vista assai complessa. E' caratterizzata da una falda che in profondità manifesta una salinità molto alta, 33 mS/m e anche più.

I campi però sono stati dotati quasi tutti di drenaggio sotterraneo che consente di versare nella rete di scola

tanto le acque salate risalenti dalla falda, quanto le acque di percolazione. Pertanto al termine della stagione umida invernale è presente sopra l'acqua salata un sottile strato di acqua salmastra che deriva dal mescolamento delle acque dolci di percolazione con le acque salate di falda, di norma non rilevato dalla sonda, posta nei piezometri a profondità maggiore, ma solo nei rilievi di stratificazione. Quando è stata rilevata essa aveva ocietà

### **Caratterizzazione della coltura**

Della coltura vanno dati i tempi di sviluppo nella fase vegetativa, la massima copertura raggiunta all'inizio della fase riproduttiva, nonché i tempi di inizio della senescenza e di maturazione del raccolto. Questi dati dovrebbero essere e sono stati in effetti forniti dal rivenditore della semente. In relazione allo sviluppo della parte aerea della coltura deve essere fornito anche quanto necessario a definire la profondità delle radici e la distribuzione della attività di assorbimento idrico sullo strato.

Un ultimo dato necessario è la efficienza d'impiego dell'acqua, cioè il rapporto fra biomassa secca prodotta e acqua traspirata, che in pratica dipende quasi soltanto dal tipo di fotosintesi della coltura. Le colture con fotosintesi di tipo C4, come mais e sorgo, sono più efficienti di quelle di tipo C3 come frumento, orzo.

La ditta fornitrice della semente era la Società Italiana Sementi (SIS) e la cultivar utilizzata mais Krups, classe FAO 600, con maturazione in 125 gg o 1600 gradi giorno. Per l'efficienza d'impiego dell'acqua, la profondità iniziale delle radici e la velocità di crescita, sono stati confermati i valori standard del mais. La profondità massima delle radici è stata posta pari a 1 m tenuto conto dell'elevato livello della falda nell'area. Era previsto il raccolto della coltura alla fase di maturazione cerosa per l'impiego in stalla e così è stato.

### **Irrigazione**

Deve essere fornito il criterio secondo cui erogare le irrigazioni. Si sono esaminate due alternative: il criterio storico, che Agrisfera ha seguito assecondando i suggerimenti di IRRINET, ed un criterio che mirasse a ridurre lo stress idrico sulla coltura.

Nel campo esaminato, l'acqua facilmente disponibile ammonta a circa 110 mm mentre per ragioni organizzative



l'adacquata ci è stato detto era bene non superasse i 50 mm. C'è quindi un ampio margine di regolazione e la coltura può essere fatta crescere senza stress in condizioni più o meno asciutte.

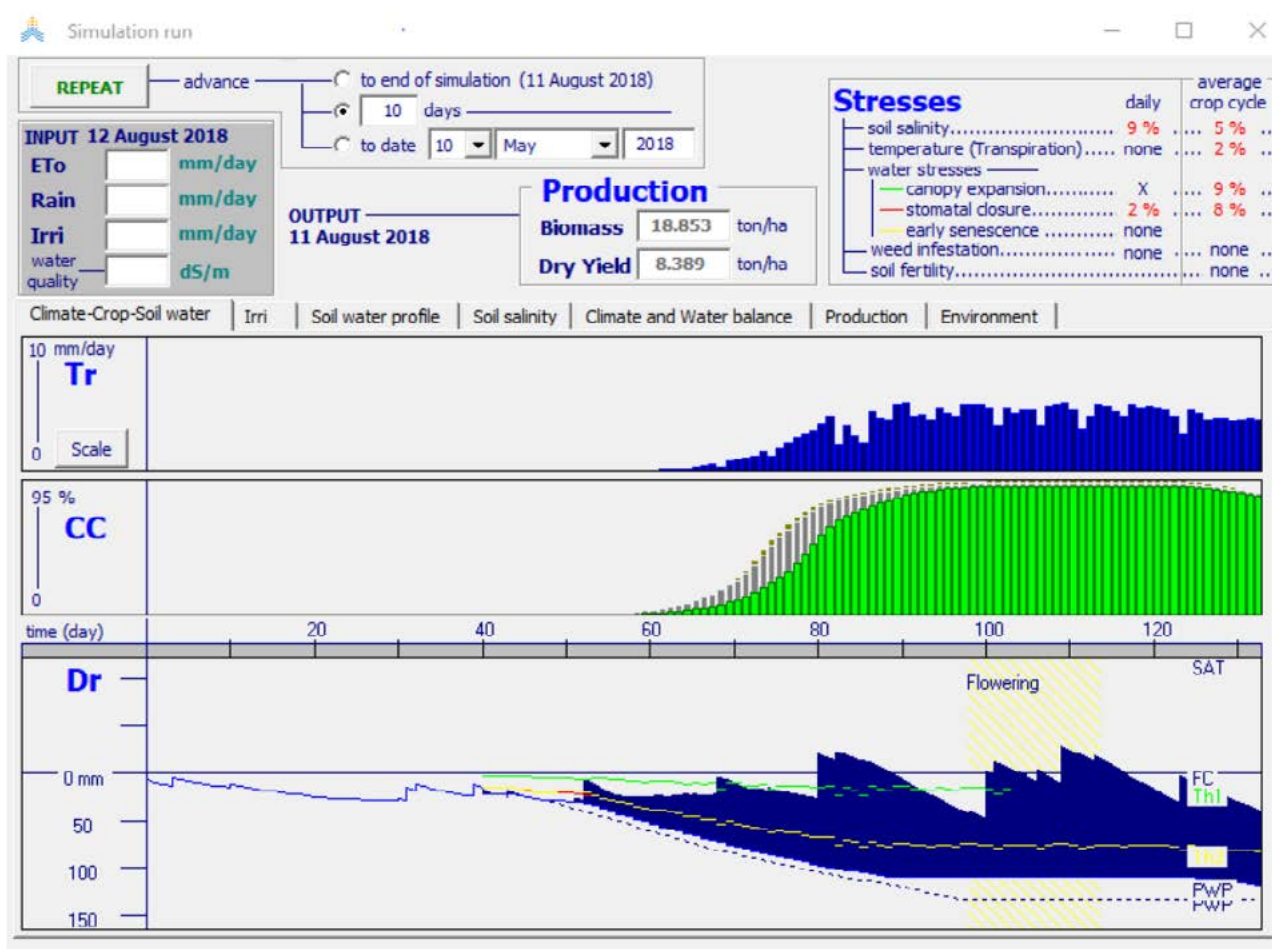
Poiché il suggerimento di IRRINET tende a risparmiare acqua, si è scelto un criterio alternativo di gestione in condizioni di umidità dei suoli anche elevata.

### Sviluppo e resa della coltura

Riportiamo qui i risultati salienti di due simulazioni, la prima corrispondente a quanto effettivamente fatto, con confronto fra i risultati di AquaCrop e del monitoraggio sulla coltura.

### Validazione del modello

Seguendo i suggerimenti di IRRINET, la prima irrigazione è prevista al 22 giugno, poi sono previste altre due in luglio, tutte di entità compresa fra 40 e 50 mm. La figura 3.5.2 mostra lo sviluppo della coltura attraverso la traspirazione (Tr in figura) o rateo di accumulo della biomassa, lo sviluppo del fogliame (CC in figura) e il variare del contenuto d'acqua nel terreno (la fascia blu). Il margine inferiore di questa fascia tiene conto della profondità delle radici; la linea blu rappresenta la capacità di campo, mentre le linee gialla e verde rappresentano il campo di umidità ottimale limitato inferiormente dallo stress indotto sulla pianta da una elevata tensione dell'acqua nel suolo e



**Figura 3.5.2.** - Sviluppo della coltura di mais Krups nell'estate 2018 secondo AquaCrop e con le irrigazioni effettive. Si possono rilevare le cause di minor resa al raccolto (stress), le principali riguardano lo sviluppo vegetativo per difetto o eccesso di umidità; segue l'effetto della salinità naturale dei suoli.

**Figure 3.5.2.** -Development of the Krups maize crop in summer 2018 according to AquaCrop and with actual irrigations. The causes of lower yield of the crop (stress), the main ones concern the vegetative development due to lack or excess of humidity; the effect of the natural salinity of the soils follows.



superiormente dal limite indotto sullo sviluppo delle foglie da una eccessiva umidità del suolo stesso.

Il ritardo nello sviluppo del fogliame deriva dal combinato della ridotta profondità iniziale assunta per le radici (15 cm) e delle condizioni mediamente siccitose del primo periodo. La coltura ha in realtà sofferto meno di quanto appare dalla figura, suggerendo di incrementare il parametro profondità iniziale delle radici a 30 cm; con questo valore il ritardo alla crescita è minimo e si raggiunge il pieno sviluppo della vegetazione.

L'andamento del contenuto d'acqua nel suolo evidenzia alcuni periodi di eccedenza della capacità di campo dovuti al verificarsi di precipitazioni dopo

una irrigazione. Non si sarebbe comunque mai raggiunta la saturazione dei suoli con conseguente deflusso superficiale. Il superamento della capacità di campo non ha prodotto una significativa percolazione e leaching a causa della limitata eccedenza e durata corrispondente (circa 20 gg complessivi) e della bassissima permeabilità dei suoli argillosi e compatti sottostanti.

La figura 3.5.3 mostra la distribuzione della salinità del suolo al momento del raccolto e giustifica il modesto stress da sale in questa estate non particolarmente siccitosa.

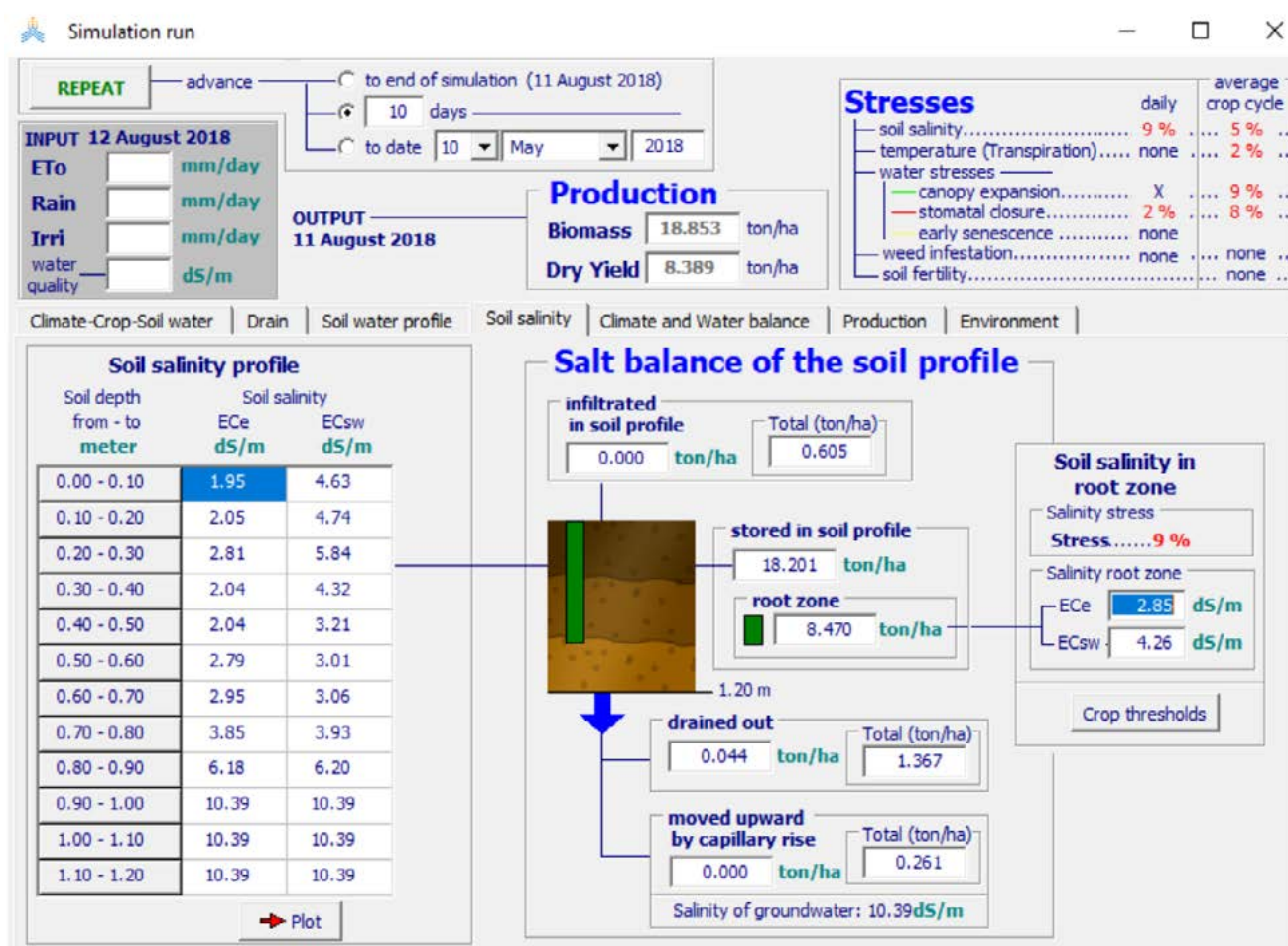


Figura 3.5.3. - Salinità stimata nel suolo al raccolto del mais allo stadio ceroso. Dove ECe supera 2, cioè nella parte inferiore dell'apparato radicale, a profondità > 50 cm, il mais ha subito un qualche stress da sale.

Figure 3.5.3. - Estimated salinity in the soil at the crop of the waxy stage maize. Where ECe exceeds 2, ie in the lower part of the root system, at depth > 50 cm, the corn would have suffered some salt stress.

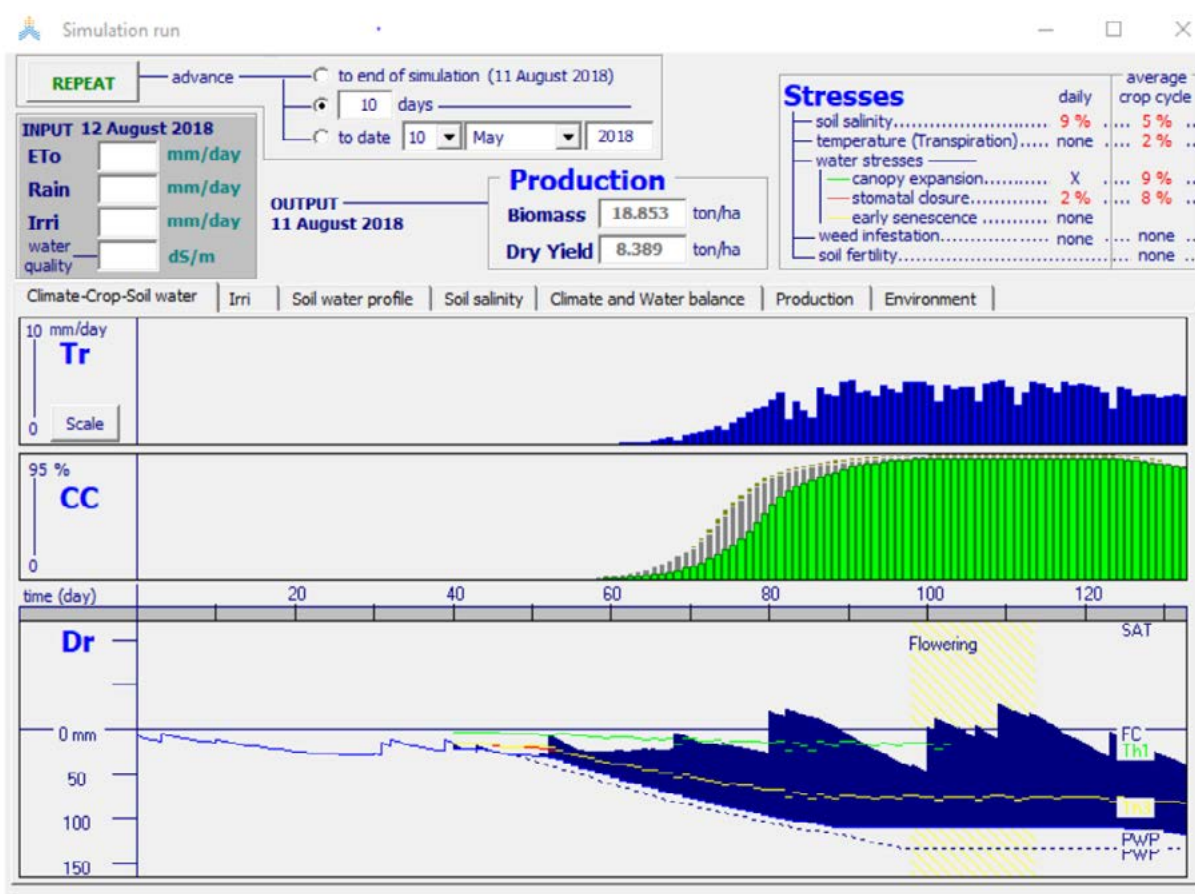
### Commento sul criterio irriguo

AquaCrop rileva carenza d'acqua in maggio, mese durante il quale nella regione Emilia-Romagna non sono previste irrigazioni, e ritiene che questo comporti un ritardo della crescita con una perdita di produzione dovuta in parte maggiore allo stress idrico, seguito da stress da salinità e eccesso di temperatura.

La profondità delle radici subito dopo la semina è stata valutata pari a 15 cm; le radici vengono così a trovarsi in strati superficiali di rapida essiccazione. Sia la assunzione di una maggior profondità iniziale

delle radici, che una anche modesta irrigazione sono sufficienti per cancellare questo stress idrico.

Il monitoraggio tramite NDVI evidenzia come già nella fase di sviluppo vegetativo (giugno) sono presenti zone di minor sviluppo che corrispondono alle zone di minor resa finale. Come meglio rappresentato nel capitolo sul monitoraggio remoto/satellitare, queste carenze sono dovute a difficoltà di emergenza e crescita nella primissima fase dello sviluppo, con questo confermando la opportunità di irrigazioni nella prima fase dello sviluppo in anni di primavera o inizio estate siccitose.



**Figura 3.5.4.** - Sviluppo della coltura di mais Krups nell'estate 2018 secondo AquaCrop con le irrigazioni suggerite dal criterio interno. Si notano due piccole irrigazioni in maggio subito dopo la semina; anche l'umidità del suolo risulta meglio gestita entro la fascia ottimale; ne consegue un minor stress idrico complessivo (al raccolto) con un associato incremento di produzione da 18,9 t/ha di biomassa secca a 20,6 t/ha previsti.

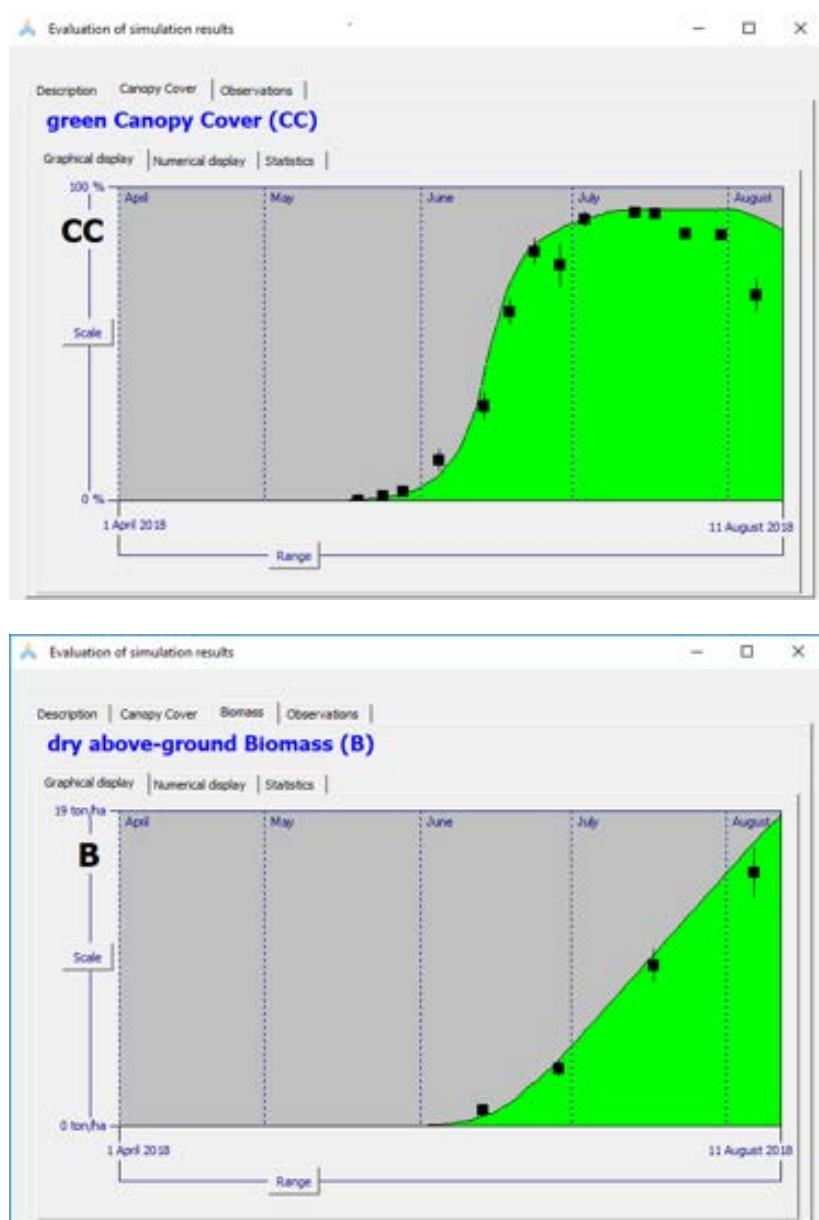
**Figure 3.5.4.** - Development of the Krups maize crop in summer 2018 according to AquaCrop with the irrigations suggested by the internal criterion. Two small irrigations are noticed in May immediately after sowing; soil moisture is also better managed within the optimal range; the result is a lower overall water stress (at harvest) with an associated increase in production from 18.9 t/ha of dry biomass to 20.6 t/ha forecast.

### Criterio irriguo alternativo

Sono state condotte diverse simulazioni con il criterio di AquaCrop, cioè irrigazione quando l'umidità del terreno scende sotto un livello di soglia adattato al ciclo fenologico.

Questo comporta sistematicamente qualche irrigazione nel maggio 2018, alquanto secco; due se la profondità iniziale delle radici è mantenuta a 15 cm, una sola se si indicano, seguendo i suggerimenti di AquaCrop 25 o 30 cm. AquaCrop, nell'estate specifica abbastanza piovosa, suggerisce due

ulteriori irrigazioni. Lo sviluppo del fogliame e della biomassa risultano in ottimo accordo, sia in quanto a tempi che a quantità, con le osservazioni di campo. Riguardo ai tempi di sviluppo, merita osservare che, avendo utilizzato come unità di misura il GDD e le indicazioni della SIS espresse in questa unità, gli scostamenti si sono mantenuti sempre entro i due giorni. I tempi di sviluppo originariamente previsti e poi aggiornati in base alla vicenda metereologica dell'anno possono quindi essere utili all'agricoltore per la programmazione delle attività.



**Figura 3.5.5.** - Verifica, tramite il confronto con i rilievi di campo, dello sviluppo della vegetazione e dell'accumulo di biomassa previsti da AquaCrop

**Figure 3.5.5.** - Verification, through comparison with field surveys, of the development of vegetation and accumulation of biomass predicted by AquaCrop

La figura 3.5.5 evidenzia la buona rispondenza dello sviluppo dell'apparato fogliare e dell'accumulo di biomassa fra valori simulati ed osservazioni di campo.

Le irrigazioni di maggio eliminano lo stress idrico in quel periodo e consentono di prevedere uno sviluppo della coltura perfettamente in linea con quello osservato, ottenendo una produzione leggermente superiore.

Rimane lo stress da salinità, in quanto acqua salmastra risale per capillarità prima dell'allagamento dei dreni con acqua dolce, questa acqua viene concentrata dalla traspirazione della coltura ed è contrastata solo marginalmente dalla risalita di acqua dolce dai dreni e dalla irrigazione superficiale.

Abbiamo simulato una irrigazione oltre la capacità di campo per produrre lisciviazione (leaching) ma senza successo per la bassissima permeabilità dei suoli sotto lo strato arato.

Migliori effetti si sono ottenuti:

1. allungando le radici nella fase iniziale (30 cm);
2. alzando il livello di intervento irriguo (70%, e 50% di perdita della RAW); elimina le punte di poca umidità e alta salinità nei suoli;

Complessivamente si riesce a simulare una produzione di biomassa secca di oltre 24 t/ha a maturazione fisiologica e 21 t/ha a maturazione cerosa.

I valori indicati si riferiscono ai punti N e S di rilievo, entrambi posti in una zona del campo di buona produttività.

## Conclusioni

L'esperienza ha consentito di calibrare il modello in tutte le sue componenti. In particolare i valori di default dei parametri della coltura si sono dimostrati idonei, così come il criterio interno d'irrigazione secondo necessità. La calibrazione è consistita soprattutto nella valutazione dei parametri idraulici del suolo, determinati in base alla tessitura e alla struttura derivante dalle lavorazioni, necessarie in questi terreni argillosi.

AquaCrop si è dimostrato un buono strumento di gestione dell'irrigazione sia in termini di tempi, che di quantità, ed anche di rappresentazione degli stress da sale.

Il buon esito della prova ha convinto Agrisfera ad adottare per l'anno successivo i consigli irrigui forniti secondo la metodologia delineata.



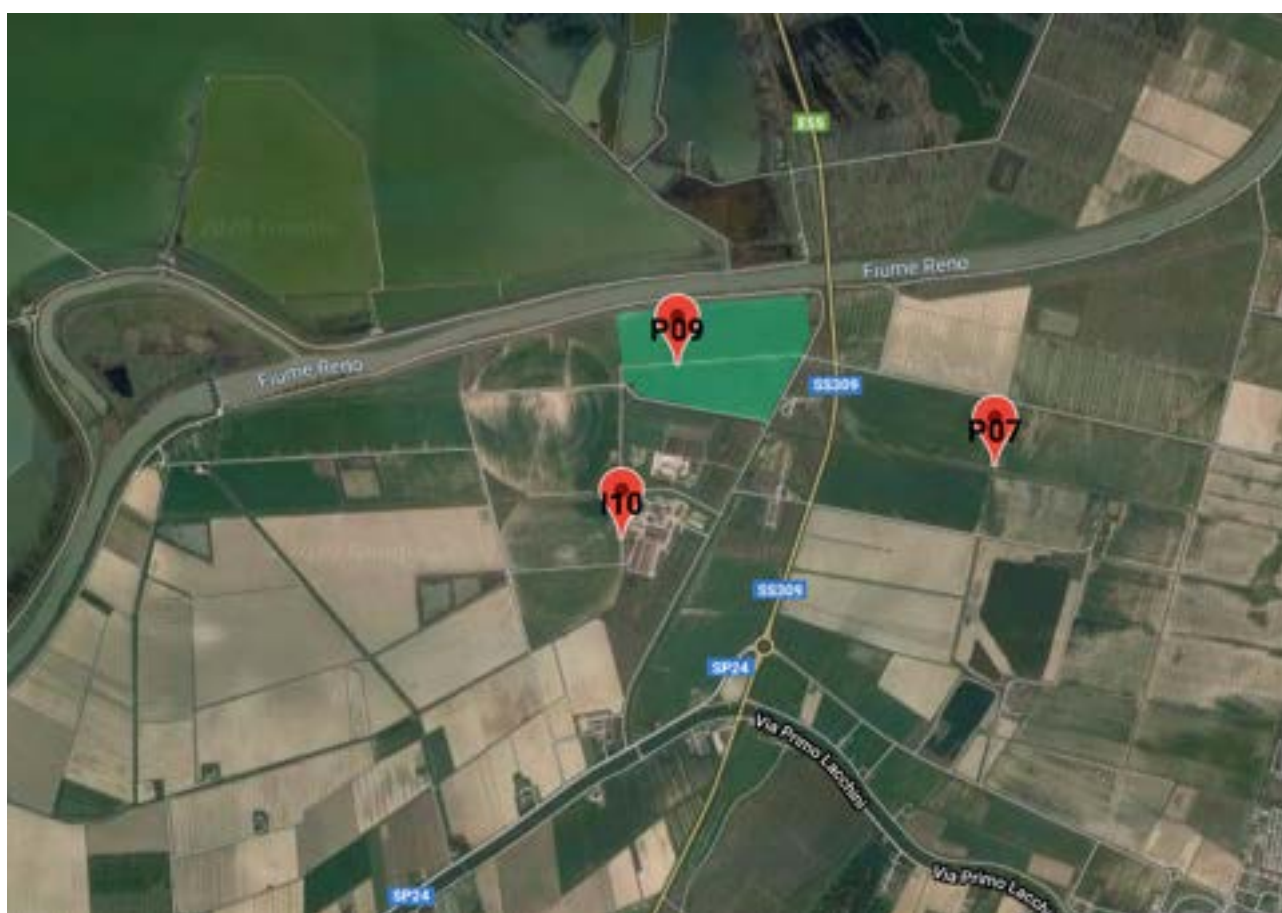
**3.6** - The environmental condition of the specific year and of the experimental field are considered: quality of irrigation water, field properties, actual irrigation. AquaCrop simulations are compared with final yield production and with satellite derived maps of appropriate indices, as well as with UAV images aiming to determine the causes of imperfect yield.

### 3.6. - STAGIONE CULTURALE 2019: FORMULAZIONE DEL CONSIGLIO IRRIGUO IN CLOSED LOOP

**Campo, coltura e qualità dell'acqua di irrigazione:  
il contesto**

A fine 2018 Agrisfera, nel confermare che si poteva passare alla gestione dei consigli in closed loop, cioè che poteva

impegnarsi a dar seguito ai consigli, ha indicato per la gestione sperimentale il campo dello Squadro 5 in cui si sarebbe coltivato mais nel 2019. Il campo è evidenziato in figura #1, in alto. In esso al termine della stagione 2018 è stato installato un sistema di tubi drenanti come nel campo dell'anno precedente.



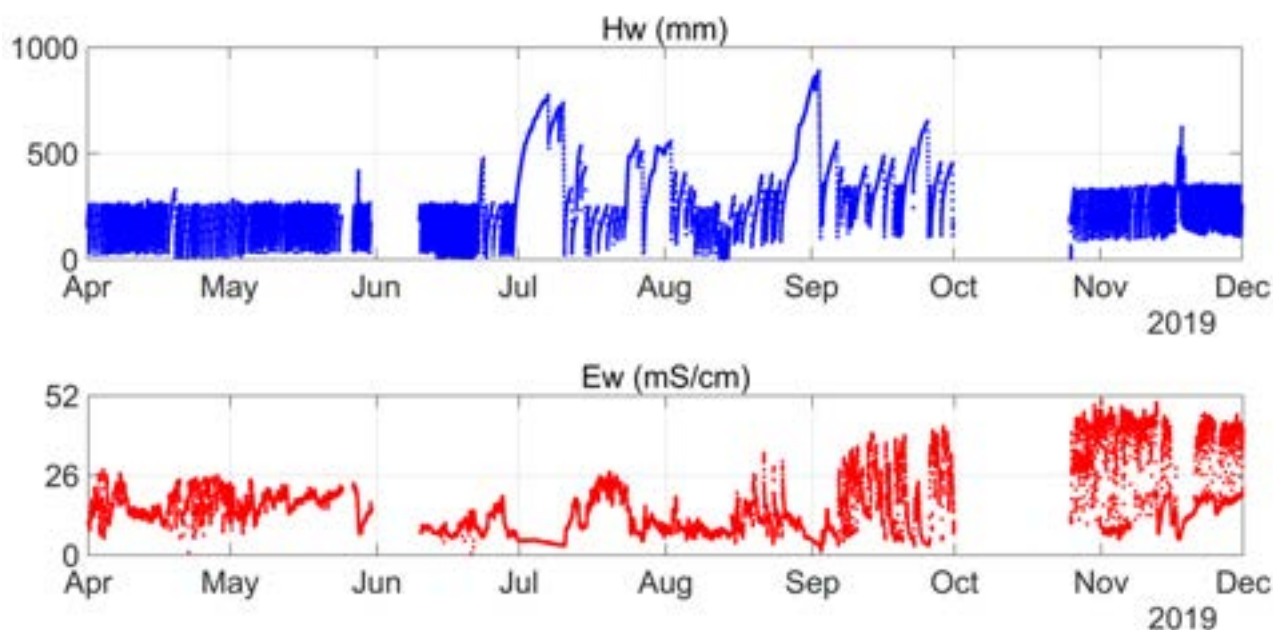
**Figura 3.6.1.** - Il campo sperimentale 2019 evidenziato in verde a Sud dell'argine di Reno

**Figure 3.6.1.** - The 2019 experimental field highlighted in green south of the Reno river embankment

A inizio anno non era chiaro come sarebbe stato irrigato il campo rimanendo in alternativa un approvvigionamento di acque di ottima qualità dalla canaletta Mandriole, attraverso canali correnti ai piedi dell'argine di Reno, o dal canale Busona, che fiancheggia il campo sul lato Sud ma

non garantisce acqua di qualità idonea.

Poi le difficoltà tecniche di un approvvigionamento dalla canaletta Mandriole hanno forzato l'utilizzo dell'acqua del canale Busona.



**Figura 3.6.2.** - Andamento dei livelli e della salinità nel corso del 2019 nel canale Busona, da cui è stata prelevata l'acqua di irrigazione; dati desunti dall'idrometro I09.

**Figure 3.6.2.** - Water level and salinity trends in 2019 in the Busona canal, from which the irrigation water was taken; data taken from the I09 hydrometer.

La figura 3.6.2 mostra un esempio delle informazioni registrate in continuo dal sensore installato sul canale "La Busona", in corrispondenza del nodo I09, per il periodo Aprile-Dicembre 2019. Il sensore registra temperatura (non mostrata), livello (Hw in mm, blu) e conducibilità elettrica (Ew, mS/cm=dS/m, in rosso) dell'acqua del canale. Questa registrazione è particolarmente interessante perché definisce la qualità dell'acqua utilizzata per l'irrigazione del mais BIO nel corso della stagione estiva 2019. Il tracciato evidenzia valori di conducibilità elettrica dell'acqua intorno a 4 dS/m nei momenti migliori, ma con punte di quasi 26 dS/m anche in piena stagione irrigua.

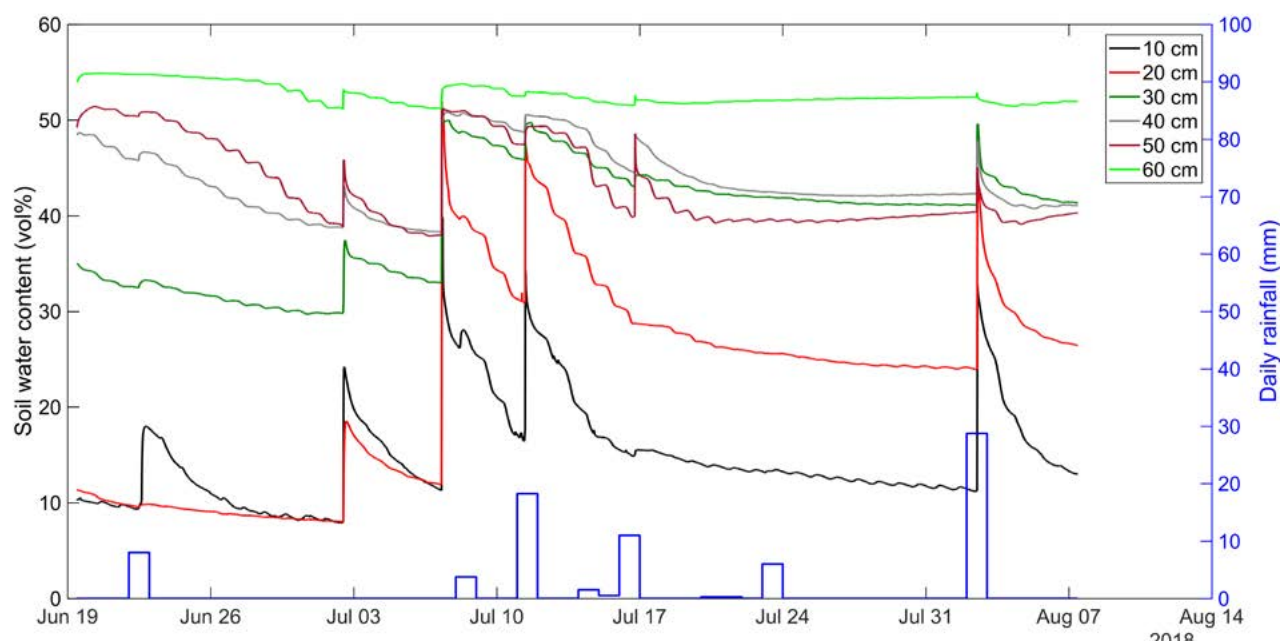
Le variazioni di livello in aumento, indicano l'immissione di acqua dolce in preparazione all'irrigazione che si accompagnano ad una minor salinità dell'acqua nel canale. Questa immissione come si vede è sporadica con interposti numerosi svuotamenti dei canali, che si verificano anche nel pieno della stagione irrigua (giugno-agosto). Essi

avvengono per decisione del Consorzio (CBRO) ai fini della protezione idraulica dalla esondazione causata da precipitazioni estive intense, al di fuori del controllo dell'agricoltore.

Il campo non fa parte di quelli inizialmente attrezzati per il monitoraggio, per cui si è deciso di realizzare un piezometro, il P09, e di attrezzare il nodo anche con sensori di umidità e salinità del suolo (Decagon GS3 e Sentek).

Nell'installare il piezometro si è reso evidente che sotto una coltre di circa 1,80 m di suolo, limoso nel primo metro e argilloso nello strato sottostante, era presente uno strato di sabbia sciolta con acqua di falda salmastra.

La varietà di mais prescelta è risultata la P1517W della Pioneer, classe FAO 600 maturazione in 128 gg, da raccogliere allo stadio ceroso. A causa di un mese di maggio molto piovoso essa è stata seminata



**Figura 3.6.3.** - Umidità del suolo registrate dal sensore Sentek ogni 10 cm fino alla profondità di 60 cm, con le precipitazioni e irrigazioni giornaliere.

**Figure 3.6.3.** - Soil humidity recorded by the Sentek sensor every 10 cm down to a depth of 60 cm, with daily rainfall and irrigation.

assai tardi il giorno 23/5.

A partire da metà giugno sono stati emessi consigli irrigui, mediamente 2 per settimana, fino all'approssimarsi della maturazione cerosa. Le caratteristiche del terreno fornite, limo argilloso, ne hanno fatto un terreno con buona capacità di accumulo d'acqua, a cui non corrisponde a posteriori tutto il campo.

Il sistema di irrigazione era costituito da un irrigatore a pioggia che adacquava una striscia larga 120 m in direzione E-O nell'arco di una giornata, mosso da un rotolone e alimentato da una pompa pescante nel canale Busona.

### I consigli irrigui emessi ed irrigazioni effettuate

Il consiglio irriguo è strutturato nel modo seguente:

- Una intestazione comune a tutti i consigli su questo campo, facente riferimento al progetto, al campo e alla coltura in esso praticata,
- Lo stato attuale stimato del suolo e della coltura, comprendente:

- un riferimento all'ultima irrigazione presa in considerazione, per evitare fraintendimenti dovuti a ritardi di comunicazione;
- l'acqua nel suolo facilmente disponibile per segnalare la eventuale urgenza dell'irrigazione
- lo sviluppo della coltura come grado di copertura, profondità delle radici, biomassa.
- Precipitazione prevista nei 5 giorni successivi al consiglio.
- Consiglio irriguo, ove
  - da quanto acquisito dalla WSN, si valuta la salinità dell'acqua utilizzata
  - si raccomanda per una data specificata la quantità d'acqua unitaria ( $\text{mm} = \text{l/mq} = 10\text{mc/ha}$ ) da erogare,
  - si indica anche la successiva irrigazione prevista,
  - si indica la resa stimata al raccolto e lo stress da sale;
- Si richiede poi di segnalare le caratteristiche (quantità e fonte dell'acqua) dell'irrigazione effettuata.
- Si forniscono infine delle note al consiglio, che

consentano di meglio interpretare il consiglio, tenuto conto ad es. della salinità dell'acqua, della sua variabilità e dell'utilizzo combinato di acqua dolce di precipitazione e di acqua irrigua, nonché del rischio che il sale si accumuli nel suolo.

Alla semina il suolo era alquanto umido per le elevate precipitazioni di maggio. Dalla semina al raccolto le precipitazioni hanno contribuito con 161 mm in tre eventi principali (42 mm attorno al 27 Maggio, 49 mm il 22 Giugno, e 40 mm intorno al 13 Luglio) ed altre precipitazioni minori.

A seguito dei consigli emessi si è irrigato una prima volta attorno al 5 Luglio con 45 mm di acqua avente conducibilità 4,4 dS/m, ed una seconda volta attorno al 1 Agosto con 50 mm d'acqua avente conducibilità 8.0 dS/m. Stante la dimensione del campo la irrigazione si protendeva per 5 gg, di cui

uno interessava l'area del sensore.

Successivamente la cattiva qualità della fonte d'acqua combinata con la discreta capacità di accumulo dei terreni ha sconsigliato di praticare ulteriori irrigazioni che avrebbero accentuato la salinità del suolo.

#### Resa della coltura e cause dei limiti

Al raccolto la previsione del DSS ha fornito per il campo in sperimentazione una resa di 19.0 t/ha di biomassa aerea secca, corrispondenti a circa 55 t/ha di biomassa fresca. Agrisfera ha fornito una mappa di produzione presentata in Figura #4, dalla quale si evince che la produzione simulata è stata ottenuta solo nelle aree di migliore resa, mentre la produzione media è stata di 33.3 t/ha in termini di prodotto fresco e di 11.4 t/ha di biomassa secca.

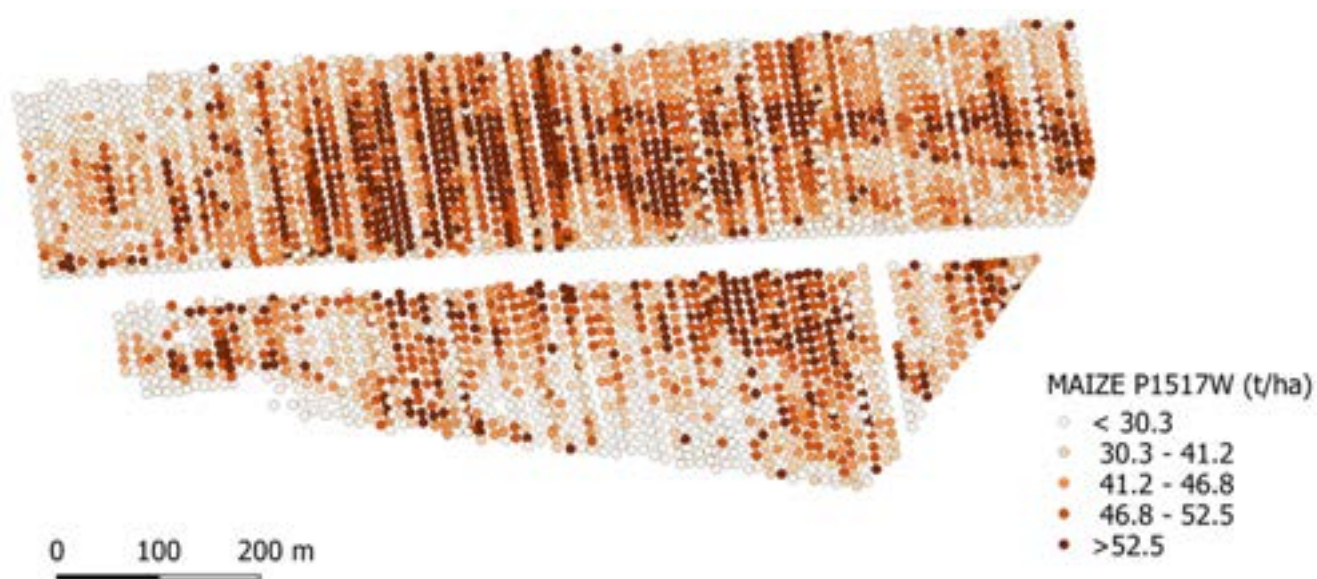


Figura 3.6.4. - Mappa della produzione di mais ceroso al raccolto allo stato umido.

Figure 3.6.4. - Map of waxy maize production as humid biomass at harvest.



La resa non è elevata per effetto di alcune aree meno produttive e dello stocco lasciato sul campo; anche in questo caso come in quello del 2018 è evidente

una forte correlazione fra resa al raccolto e sviluppo vegetativo poco prima della fioritura, vedi Figura 3.6.5.



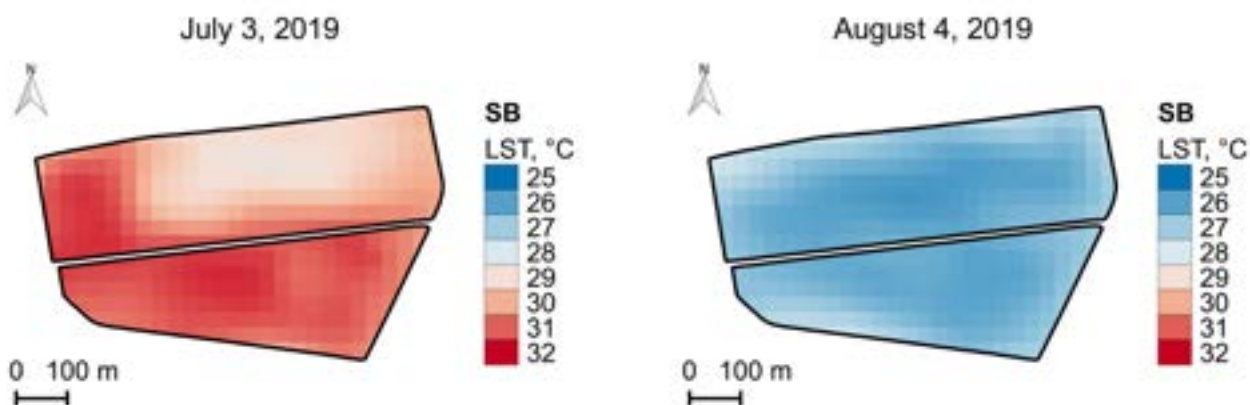
**Figura 3.6.5.** - *Mapa dell'indice NDVI alla data 23/07/2019.*  
**Figure 3.6.5.** - *Map of the NDVI index as of 07/23/2019.*

Nel campo è anche evidente una importante disomogeneità del suolo nelle sue porzioni Sud e Ovest. L'evapotraspirazione, in ragione del rilevante calore latente di vaporizzazione, determina un abbassamento della temperatura superficiale, vedi Figura 3.6.6.

Al 3 Luglio, la elevata temperatura nella porzione Sud e Ovest denota condizioni siccitose del suolo e scarsa evaporazione, infatti il rilievo precede

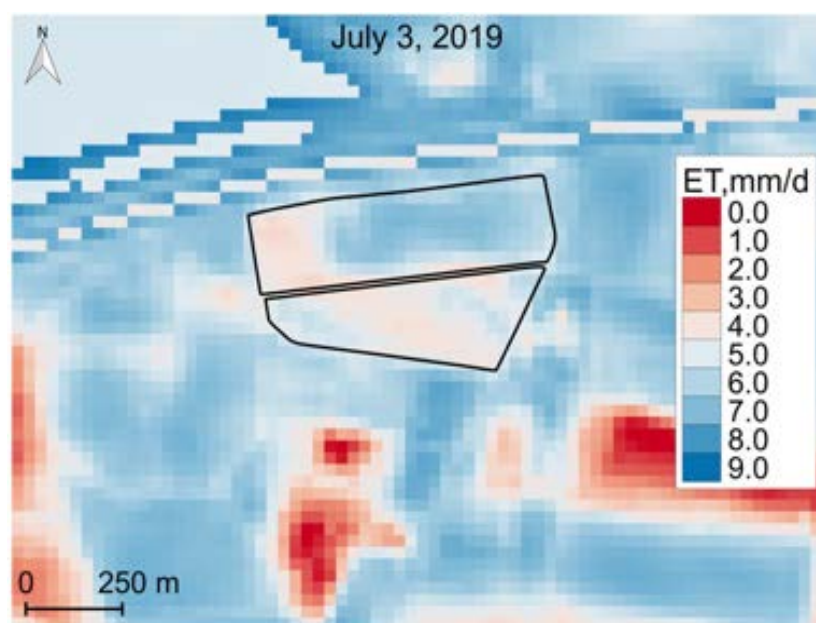
esattamente un evento di irrigazione, segno che anche l'agricoltore riteneva il campo bisognoso di acqua. Il passaggio del 4 agosto rileva invece una situazione immediatamente successiva ad una irrigazione avvenuta intorno al 1 Agosto; la più rapida perdita di umidità del suolo denota elevata permeabilità e percolazione.

La figura 3.6.7 rappresenta la evaporazione stimata nella giornata del 3 Luglio.



**Figura 3.6.6.** - Distribuzione della temperatura della superficie del suolo desunta dai rilievi Landsat-8 ai passaggi del 3 Luglio e 4 Agosto ore 11 solari.

**Figure 3.6.6.** - Distribution of the temperature of the soil surface taken from the Landsat-8 surveys at the passages of 3 July and 4 August at 11 solar hours.



**Figura 3.5.7.** - Distribuzione della evapotraspirazione del giorno 3/7 stimata con SEBAL sul campo sperimentale e nelle aree adiacenti

**Figure 3.6.7.** - Distribution of evapotranspiration on day 3/7 estimated with SEBAL in the experimental field and in adjacent areas

E' evidente che la zona di minor resa corrisponde con buona precisione alla zona più calda e secca del 3/7, zona che ha poi evidenziato nelle tre settimane seguenti uno sviluppo più irregolare, quale si osserva nella immagine Sentinel di figura 3.6.5. Questa stessa zona corrisponde all'affioramento di suoli sabbiosi di una antica duna costiera evidenziato nella figura 3.5.1 del capitolo precedente. Appare quindi verosimile che la scarsa resa in questa zona sia almeno in parte da attribuire alla modesta capacità di ritenzione dei suoi suoli sabbiosi. Sono presenti però fenomeni che non appaiono

nelle immagini satellitari per la loro limitata risoluzione (10 e 30 m). Il rilievo con drone di cui si tratta al capitolo 4.8 ha fornito immagini di estremo dettaglio. La figura 3.6.8 rappresenta un'area di 30x30 m corrispondente esattamente ad un pixel del rilievo Landsat-8.

Si nota come la mancata crescita delle piante di mais si manifesta nella zona sabbiosa con una forte strutturazione per filari: lungo alcuni lo sviluppo è buono lungo altri, è molto lacunoso, segno che oltre alla natura dei suoli anche il processo di semina è concausa della scarsa resa.



**Figura 3.6.8.** - Immagine RGB ottenuta da drone ritagliata su un'area 30x30 m<sup>2</sup> (pixel del rilievo Landsat-8) in un area di bassa resa.

**Figure 3.6.8.** - RGB image obtained by drone cropped on a 30x30 m<sup>2</sup> area (pixels of the Landsat-8 image) in a low-yield area.

Considerata la scala di queste modulazioni della resa, aventi periodicità intorno ai 10 m, è chiaro che queste forme non possono risultare visibili né sulle immagini Sentinel né tantomeno sulle immagini Landsat.

### Conclusioni

Il caso di applicazione si è dimostrato assai complesso e difficile per due motivi prevalenti:

- la scarsa qualità dell'acqua irrigua e la aleatorietà dei livelli e della qualità;
- terreno non omogeneo del campo a fronte di una irrigazione effettuata per semplicità a rateo uniforme.

La resa finale non può non risentire degli effetti di queste difficoltà.

La resa media è il 60,0% di quella prevista da AquaCrop. Peraltro la stessa varietà seminata nella azienda Carlina il giorno successivo e raccolta il 2 Settembre, in un campo privo di problemi di salinità e con suolo apparentemente meno disomogeneo, ha

reso l'80,5% di quanto previsto da AquaCrop. Della mancata produzione un 15% circa è però attribuibile alla biomassa organica dello stocco lasciato volutamente sul campo.

Il DSS ha contribuito ad ottenere un raccolto decoroso anche in queste condizioni difficili, informando soprattutto sulle date di intervento e sulla qualità dell'acqua. A riguardo della quantità erogata da un singolo intervento essa è assai poco variabile in quanto legata alla capacità di ritenzione dei suoli. La caratterizzazione dei suoli adottata si avvicina molto alla media dell'area, per cui non stupisce che con percorsi diversi la quantità suggerita dal DSS sia risultata in ottimo accordo con quanto desunto per via empirica dagli agricoltori.

Peraltro per la zona avente suolo sabbioso il DSS avrebbe suggerito adacquate di minore entità, pari al 50-60% della capacità di ritenzione idrica, ma più frequenti, che avrebbero richiesto una organizzazione più flessibile di quella effettivamente adottata.



### 3.7. - IL PORTALE PER IL CONTATTO CON GLI AGRICOLTORI

Il portale web AGROWETLANDS, accessibile al sito

<http://winetsrl.serveftp.com:8889/index.php/login>

tramite credenziali, rappresenta l'interfaccia con l'utente nell'ambito del Sistema SMART AGROWETLANDS. L'accesso alle funzioni del portale AGROWETLANDS per gli utenti agricoltori avviene tramite login. All'utente agricoltore, preventivamente autorizzato dall'Amministratore, viene richiesto di autenticarsi con le credenziali che gli sono state assegnate dall'Amministratore stesso, costituite da username e password. E' disponibile una funzione di "recupero password".

Il portale opera via rete e si potrà accedervi vuoi da computer, vuoi da smart-phone. Esso:

- riceve dall'Amministratore del sistema e dall'Agricoltore i dati relativi agli appezzamenti e alle colture praticate,
- comunica i consigli irrigui,
- mette a disposizione degli utenti autorizzati le misure acquisite dai nodi hardware della WSN distribuiti nell'area di progetto.

Gli utenti fondamentalmente hanno due ruoli con possibilità diverse di accedere ai dati.

**Agricoltore (utente standard):** utente che può consultare i dati sul portale, limitatamente ai nodi assegnati ai propri appezzamenti. L'utente agricoltore deve al contempo aggiornare, per ogni stagione colturale, le informazioni di tipo agronomico riguardanti gli appezzamenti che gli sono stati assegnati (vedi Dashboard Agricoltore), in particolare le irrigazioni eseguite.

**Amministratore:** ruolo assegnato ad un unico utente. L'amministratore è responsabile della gestione della rete; può

- modificare le caratteristiche, ad es. la frequenza di acquisizione e quella di trasmissione dei dati acquisiti,
- inserire nuovi account per gli utenti agricoltori, modificare o eliminare account già esistenti,

- assegnare agli utenti agricoltori gli appezzamenti di competenza e i nodi che servono gli appezzamenti assegnati (vedi Dashboard Amministratore).

Gli appezzamenti sono aree omogenee su cui è praticata una unica coltura. Essi sono descritti dall'Amministratore, di norma come unione di una o più parcelle catastali, e vengono associate ad un congruo numero di nodi vicini in modo che tutte le variabili di interesse siano visibili: condizioni meteo, falda, fonti d'acqua per l'irrigazione e condizioni del suolo.

I dati della WSN cui gli utenti del portale possono accedere sono disponibili in forma di:

- grafici, rappresentanti il variare nel tempo di una o più variabili rilevate, con intervallo temporale a scelta dell'utente, e resa grafica a video o stampabile.
- file, scaricabili in formato CSV ed elaborabili esternamente, utilizzando ad esempio le funzionalità di Excel.
- servizi API, gestiti su richiesta da WINET s.r.l., rendono i dati rilevati dalla WSN disponibili ad applicazioni esterne, compresa l'integrazione con IRRIFRAME-IRRINET.

Completato il login, l'agricoltore è abilitato ad accedere alle funzioni del portale dedicate agli utenti agricoltori. All'agricoltore viene presentata la pagina del portale detta dashboard (figura 3.7.1).

Come indicato nella barra superiore di colore grigio scuro (figura 4), le funzioni del portale cui l'utente agricoltore può accedere, sono: dashboard e grafici.

#### 3.7.1 La dashboard Agricoltore

Tramite la dashboard, l'agricoltore può colloquiare con il sistema SMART AGROWETLANDS, sia per fornire al sistema informazioni necessarie alla formulazione del consiglio irriguo, sia per ricevere dal sistema informazioni riguardanti: a) le misure effettuate dai nodi della WSN di competenza, b) le previsioni del tempo, c) i consigli irrigui.



## Dashboard Agricoltore

BioMarcabò Squadro 5 2019



### Appezzamento: BioMarcabò Squadro 5 2019

[Modifica Dettagli](#) [Nuova Irrigazione](#)

#### DETTAGLI APPEZZAMENTO

Cultura: **Mais P1517W ceroso**  
 Annata: **2019**  
 Semina: **23-05-2019**

T-base: **10 °C**  
 GDD Fioritura: **882**  
 GDD Raccolto: **1300**

#### ULTIMA IRRIGAZIONE

Data ultima irrigazione: **01-08-2019**  
 Lama Acqua ultima irrigazione: **50 mm**  
 EC ultima irrigazione: **8.0 dS/m**

#### PRECIPITAZIONE ODIERNA

 0 mm

#### TEMPERATURA ARIA MIN - MAX ODIERNA

 15.4 - 25.3 °C

#### EVAPOTRASPIRAZIONE GIORNATA DI IERI

 4.9 mm

#### GRADI GIORNO CUMULATI

 2,889.3 °C

#### Situazione meteo

Sant'Alberto

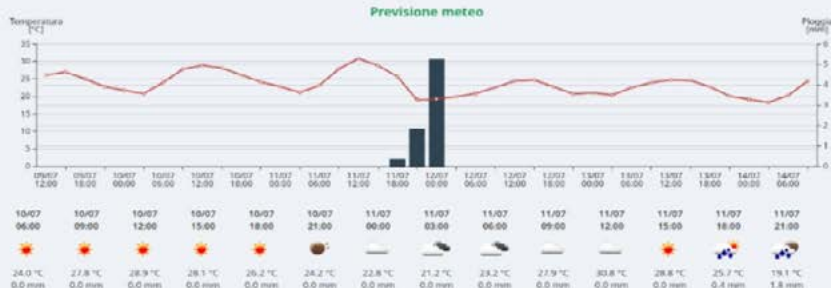
 25°C

Umidità: 60%

Press: 1017mbar

Vento: 3.6km/h

#### Previsione meteo



### Consiglio Irriguo del: 13/08/2019

#### ULTIMA IRRIGAZIONE

Data: **01-08-2019**  
 Lama Acqua: **50 mm**  
 EC: **8.0 dS/m**

#### STATO TERRENO STIMATO

Acqua nel suolo utilizzabile: **50 mm**  
 EC dell'acqua nel suolo: **6.6 dS/m**  
 Copertura della coltura: **91 %**  
 Profondità delle radici: **100 cm**  
 Biomassa secca della coltura: **15.8 t/ha**  
 Gradi giorno dalla semina: **1120 °C**

#### CONSIGLIO IRRIGUO

Data prossima irrigazione: --  
 Lama d'acqua prossima irrigazione: -- mm  
 Data irrigazione successiva: --  
 Lama d'acqua irrigazione successiva: -- mm  
 EC prevista dell'acqua fino al raccolto: **8.7 dS/m**  
 Stress da sale previsto al raccolto: **16 %**

Figura 3.7.1. - La dashboard agricoltore e le diverse sezioni che la compongono.

Figure 3.7.1. - The farmer dashboard with the different sections which is composed of.

La dashboard dell'utente agricoltore, consta di 12 diverse sezioni, identificate in figura 4 con numeri su campo verde. Di seguito vengono descritte in dettaglio le 12 sezioni.

**1. Selezione degli appezzamenti** - Tramite la sezione 1, l'agricoltore cui siano stati assegnati più appezzamenti, può selezionare e visualizzare uno alla volta i diversi appezzamenti che gli sono stati assegnati.

**2. Mappa interattiva** - Nella sezione 2, viene visualizzato l'appezzamento selezionato su un'immagine, tratta da Google Earth, che rappresenta un'area più ampia, limitrofa all'appezzamento selezionato. L'appezzamento appare di colore verde in tutta la sua estensione. La mappa mostra anche, evidenziata con segnalini di colore rosso, la posizione dei nodi della WSN che sono stati associati all'appezzamento. Cliccando sul segnalino che rappresenta il nodo WSN, si apre una finestra a scorrimento dove sono indicati i sensori presenti nel nodo e l'ultima lettura fatta per ciascuno di essi.

**3. Dettagli appezzamento riguardanti la coltura** - Nella sezione 3 sono riportate informazioni sulla coltura in atto fornite dall'agricoltore, quali: anno, varietà colturale, data di semina, temperatura di base, gradi-giorno alla fioritura, gradi-giorno al raccolto. Vedi anche sezione 11.

**4. Ultima irrigazione** - Nella sezione 4 sono riportate le informazioni fornite dall'agricoltore sull'ultima irrigazione effettuata (data, quantità, conducibilità elettrica dell'acqua utilizzata). Vedi anche punti 10 e 12.

**5. Precipitazione odierna** - Nella sezione 5 è indicata la quantità di pioggia cumulata nel giorno (mm). Il dato viene aggiornato in tempo reale dalla stazione meteo associata all'appezzamento.

**6. Temperatura dell'aria minima e massima odierna** - Nella sezione 6 è indicata la temperatura minima e massima dell'aria (°C) nell'arco della giornata. Il dato viene aggiornato in tempo reale dalla stazione meteo associata all'appezzamento.

**7. Evapotraspirazione della giornata precedente** - Nella sezione 7 è indicata l'evapotraspirazione potenziale ETO (mm), calcolata con la formula di Hargreaves, in base alle temperature massima e minima del giorno precedente, misurate dalla stazione meteorologica associata all'appezzamento.

**8. Gradi giorno cumulati** - Nella sezione 8 sono indicati i gradi giorno cumulati a partire dalla data di semina. I gradi giorno cumulati sono calcolati utilizzando le temperature medie giornaliere registrate dalla stazione meteo associata all'appezzamento.

**9. Situazione e previsione meteo** - Nella sezione 9 sono indicati i valori di alcuni parametri meteorologici rilevati nel giorno in cui il portale viene consultato (temperatura dell'aria, umidità relativa, pressione, velocità del vento) ottenuti per la stazione di S. Alberto (Ravenna) tramite il servizio gratuito OpenWeatherMap.org.

OpenWeatherMap fornisce inoltre un servizio di previsioni meteorologiche per un arco temporale di 5 giorni. I valori di temperatura e precipitazioni forniti dal servizio sono rappresentati sulla dashboard anche in forma grafica, mentre le previsioni meteorologiche generali sono rappresentate tramite icone, per il medesimo periodo.

**10. Consiglio irriguo** - Nella sezione 10 viene riportato l'ultimo consiglio irriguo fornito dal DSS. Il consiglio è datato e riporta, in tre riquadri distinti varie informazioni.

Nel primo riquadro: data, quantità (mm) e conducibilità elettrica dell'ultima irrigazione nota al sistema. Se questi dati fossero diversi da quanto indicato al

punto 4 è verosimile che ci sia stato uno scambio contemporaneo di informazioni, per cui il sistema non ha tenuto conto della segnalazione dell'agricoltore, che così ne è informato.

Nel secondo riquadro lo stato (stimato) del terreno, con indicazione di: quantità di acqua presente nel terreno e facilmente utilizzabile dalla pianta; conducibilità elettrica dell'acqua nel suolo, copertura (%) della coltura sul suolo, profondità (stimata) delle radici, biomassa secca (stimata) della coltura al momento, gradi giorno cumulati a partire dalla semina. Le stime di alcuni dei parametri qui indicati, vengono fornite dal modello AquaCrop, utilizzato dal DSS. Nel terzo riquadro, infine, il nuovo consiglio irriguo, con indicazione della data della prossima irrigazione e della quantità di acqua da distribuire. Viene inoltre indicata la data dell'irrigazione successiva e la quantità di acqua da distribuire, la conducibilità elettrica prevista per l'acqua di irrigazione fino al raccolto, lo stress da sale previsto raccolto. Le indicazioni riportate nel terzo riquadro, all'infuori della previsione sulla conducibilità elettrica dell'acqua di irrigazione, sono stime fornite dal modello AquaCrop.

Nel corso della stagione 2019, i consigli irrigui sono stati forniti con periodicità bisettimanale, il martedì e il venerdì. Tale frequenza tiene conto del fatto che le previsioni meteo disponibili, che concorrono a determinare il consiglio irriguo, hanno un'attendibilità di 5 giorni. Inoltre, nel periodo estivo, l'evapotraspirazione giornaliera è di circa 5 mm/giorno. Nell'intervallo che intercorre tra due consigli irrigui consecutivi (3 giorni) il suolo, in assenza di precipitazioni, perde per evapotraspirazione circa 15 mm, equivalenti a circa il 10% della RAW.

**11. Modifica dettagli** - Nella sezione 11, tramite il tasto corrispondente, l'agricoltore colloquia con il sistema SMART AGROWETLANDS, inserendo all'inizio della stagione colturale di ogni anno, le informazioni relative alla coltura praticata nella stagione in corso (varietà, temperatura base, gradi giorno per

arrivare alla fioritura ed al raccolto, tutti dati che, a richiesta, il rivenditore dovrebbe fornire con la semente).

**12. Ultima irrigazione** - nella sezione 12, tramite il tasto corrispondente, l'agricoltore colloquia con il sistema SMART AGROWETLANDS, aggiornando, nel corso della stagione colturale, le informazioni sull'ultima irrigazione praticata. Queste informazioni sono un elemento essenziale per descrivere nel corso della stagione colturale, tramite il modello AquaCrop del DSS, l'evoluzione della disponibilità di acqua nel terreno e formulare successivi consigli irrigui che siano affidabili.

### 3.7.2 I grafici per l'utente agricoltore

L'utente agricoltore accedendo alla pagina "Grafici" può visualizzare graficamente le rilevazioni fatte dai sensori presenti nei nodi di competenza del proprio appezzamento.

I grafici vengono creati tramite un'interfaccia grafica di facile utilizzo. Le specifiche per la realizzazione del grafico vengono definite in maniera interattiva dall'utente agricoltore.

L'intervallo temporale viene definito tramite le due finestre "DA" e "A" posizionate in alto a sinistra (da... giorno/mese/anno – a ... giorno/mese/anno) e poi confermato attraverso il pulsante "Applica data". Il tipo di grafico (a linea continua, o a colonne) viene scelto utilizzando le piccole icone situate in alto a destra rispetto al campo del grafico. I dati con cui è stato creato il grafico possono essere scaricati su un file esterno, di tipo CSV, rielaborabile con i più comuni programmi di analisi statistiche. L'appezzamento, il nodo e il sensore vengono scelti dai tre menu a tendina posizionati a destra del grafico. L'utente agricoltore può creare grafici relativi ai soli appezzamenti, nodi e sensori che gli sono stati assegnati.

E' possibile creare grafici a variabile singola e a più variabili (pulsante verde "Nuovo Grafico").

### 3.7.3. L'utente amministratore

L'Amministratore viene riconosciuto al login, del tutto analogo a quello dell'agricoltore, attraverso le credenziali che presenta. L'Amministratore può accedere a funzioni importanti e riservate, per cui le

sue credenziali debbono essere mantenute accuratamente riservate.

L'amministratore può accedere a tutti i nodi della rete e può vedere tutti gli appezzamenti e gli utenti, nonché correggere questi dati.

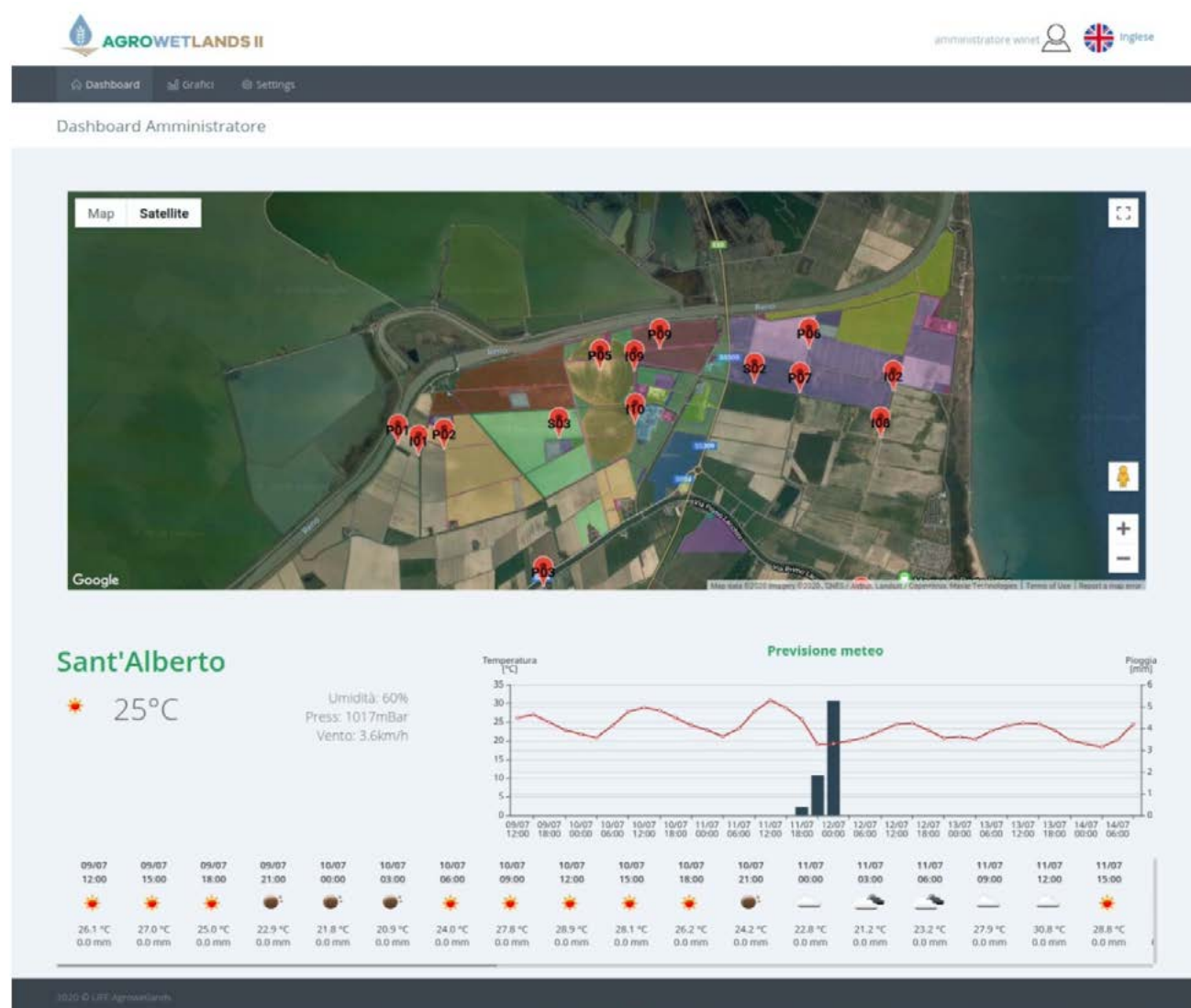


Figura 3.7.2. - La dashboard dell'utente Amministratore.

Figure 3.7.2. - The administrator dashboard.

La dashboard dell'amministratore visibile in figura 3.7.2 si compone di due sezioni

1 - Mappa interattiva, ove è rappresentata su immagine da Google Earth la mappa generale del territorio su cui è installata la WSN, e la posizione dei nodi facenti parte della WSN. Gli appezzamenti dei diversi

agricoltori inseriti nel sistema sono evidenziati con colore pieno, utilizzando colori diversi. Cliccando sui segnalini di colore rosso, che rappresentano ciascuno un nodo WSN, si apre una finestra a scorrimento, dove sono indicati i sensori presenti nel nodo e l'ultima lettura fatta per ciascuno di essi. L'amministratore ha quindi una visione totale di tutta la WSN e di



tuti gli appezzamenti inseriti nel sistema.

2 - Situazione e previsione meteo – La sezione è identica alla analoga sezione 9 del agricoltore

In alto nella dashboard sono indicati i pulsanti grafici e settings. La parte grafici è identica anc'essa a quella per gli agricoltori.

Il pulsante settings consente di accedere alle funzioni specifiche riservate all'amministratore.

1. la attribuzione e gestione delle credenziali agli utenti;

2. la attribuzione degli appezzamenti agli utenti, sia come aree che come nodi associati;

3. impostazione della rete di acquisizione e verifica della sua funzionalità.

Il tasto settings rimanda a tre pagine corrispondenti alle suddette funzioni.

La prima non richiede una discussione tecnica: l'utente dopo la registrazione, dovrà rivolgersi all'amministratore se incontrasse problemi di

AGROWETLANDS II

administratore inglese

Dashboard Grafici Settings

Plots

GESTIONE APPEZZAMNETI

Map Satellite

Google

+ nuovo appezzamento

Show: 10

Search:

Nome	Annata	Agricoltore	Coltura	Data semina	T base	GDD Fioritura	GDD Raccolto	Stazione Meteo	Parcelle
BioMarcabò Squadro S	2019	Mirco Sacchetti	Mals P1517W ceroso	2019-05-23	10	882	1300	272	22,23,24,32,37,51,52,53

Showing 1 to 1 of 1 records

2020 © LIFE Agrowetlands

Figura 3.7.3. - La pagina "Gestione appezzamenti" con le parcelle ed i sensori

Figure 3.7.3. - The page "Land plot management" with parcels and sensors.

Per la registrazione degli appezzamenti, l'agricoltore dovrà concordare con l'amministratore, oltre alle parcelle che compongono l'appezzamento, i sensori di cui ha bisogno, con qualche ridondanza che possa supplire al malfunzionamenti di qualcuno almeno per i sensori critici.

I dati relativi al terreno saranno desunti dalla carta pedologica e la profondità di aratura sarà assunta pari a 35 cm ove non meglio specificata. Ogni verosimile scostamento deve essere segnalato.

Potendo cambiare la coltura di anno in anno e non volendo perdere le informazioni degli anni precedenti, il complesso delle informazioni viene associato al combinato appezzamento anno. Ogni anno nel chiedere di rinnovare l'appezzamento, si potranno modificare le informazioni associate che, ove non specificato espressamente, saranno ricopiate dall'anno precedente.

Nello scegliere i nodi, ci si basa sulla vicinanza dei nodi stessi all'appezzamento e sulla similitudine del

### IMPOSTAZIONI DI RETE

Impostazioni dei tempi di trasmissione dati e di campionamento dati.  
Il tempo di trasmissione DEVE essere multiplo di quello di campionamento

Tempo di trasmissione:

Tempo di campionamento:

Salva

### GESTIONE DISPOSITIVI

Selezionare un dispositivo per poter accedere al menù di modifica

Salva istantanea mappa

Mappa

Satellite

#### I10

Show

Search:

id	Nome	Tipologia	Azioni
2194	CTD10_Ew	Conducibilità CTD-10	Modifica
2192	CTD10_Hw	Profondità CTD-10	Modifica
2193	CTD10_Tw	Temperatura CTD-10	Modifica

Showing 1 to 3 of 3 records

«

<

1

>

»

Figura 3.7.4. - La pagina "Impostazione della rete, dei nodi e dei sensori" del menu Settings

Figure 3.7.2. - The page "Definition of the network, nodes and sensors" of the menu Settings

terreno. Si dovrà poi verificare che sia compreso sempre un nodo in cui è presente una stazione meteorologica, un nodo con un sensore per l'acqua di falda, un nodo con un sensore per l'acqua irrigua, almeno un nodo con un sensore per il suolo. I sensori presenti nei nodi selezionati, forniranno al DSS le informazioni necessarie per la formulazione dei consigli irrigui per quell'appezzamento.

La pagina "Impostazione della rete, dei nodi e dei sensori", terza pagina del menu Settings, consente all'amministratore di definire/modificare alcune impostazioni che riguardano la WSN e alcune impostazioni che riguardano i sensori (figura 3.7.4).

Come indicato nel riquadro superiore, le impostazioni modificabili che riguardano la WSN sono il tempo di trasmissione e il tempo di campionamento. Il tempo di trasmissione deve essere un multiplo del

tempo di campionamento. Nell'immagine il tempo di trasmissione è di 60 minuti, il tempo di campionamento è di 10 minuti. Questo significa che il sensore registra le misure ogni 10 minuti, e che ogni 60 minuti trasmette al nodo coordinatore tutte le misure fatte nell'intervallo di 60 minuti.

Tramite il riquadro inferiore di figura 9, l'amministratore può effettuare modifiche sulla configurazione dei sensori. Sulla mappa interattiva è rappresentata la localizzazione dei nodi della WSN. Cliccando su un nodo, vengono visualizzati a fianco della mappa interattiva, i sensori presenti in quel nodo e i parametri misurati da ciascun sensore (id – nome – tipologia). Cliccando sul pulsante giallo "Modifica", l'utente amministratore può modificare gli attributi "id", "nome" e "tipologia" del sensore selezionato.

## 4. VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI SMART AGROWETLANDS

**4.1** - The normal hydrological conditions of the study area and those specific to the irrigation monitoring and management period are described. The area is subject to irregular rainfall with short and not severe arid periods. The temperature pattern presents a very regular annual cycle and a weak temperature rise: around 1°C over 30 years.

### 4.1. - CONDIZIONI IDROLOGICHE DEL PERIODO DI MONITORAGGIO

Le stazioni meteo dei nodi P07 e P02 consentono di caratterizzare il variare della precipitazione e della temperatura nel tempo fornendo al contempo un confronto con le condizioni climatiche medie.

Non disponendo di una pluridecadale registrazione alle suddette stazioni, le condizioni medie di precipitazione e temperatura sono state desunte dalla stazione di Guagnino, 44,69 °N, 12,21 °E, in comune di Comacchio

(FE), per la quale ARPAE ha pubblicato i dati medi mensili per i due trentenni 1961-1990 e 1991-2019.

Nella tabella 4.1.1 sono riportati i valori medi mensili e annui mediati sui due trentenni rilevati a Guarino, mentre nelle figure seguenti è rappresentata la vicenda idrologica sul periodo di monitoraggio set-17-set-20. ARPAE pubblica anche gli scostamenti quadratici medi fra i valori mensili nei diversi anni, dati rilevanti per valutare la significatività delle differenze fra i due trentenni.

Trentennio	Precipitazione medie mensile e annua, mm		Temperatura media mensile e annua, °C	
	1961-1990	1991-2019	1961-1990	1991-2019
Gennaio	49,1	34,0	2,5	3,5
Febbraio	41,4	48,5	4,9	5,2
Marzo	50,0	40,4	8,4	9,5
Aprile	47,9	48,8	12,5	13,5
Maggio	54,5	59,9	17,0	18,4
Giugno	44,7	62,0	20,8	22,7
Luglio	51,1	33,5	23,3	25,0
Agosto	74,2	55,7	23,1	24,8
Settembre	59,4	74,9	19,9	20,3
Ottobre	54,7	80,6	15,0	15,4
Novembre	74,6	73,9	8,8	9,7
Dicembre	53,7	51,8	3,5	4,2
Anno	655,3	664,0	13,3	14,4

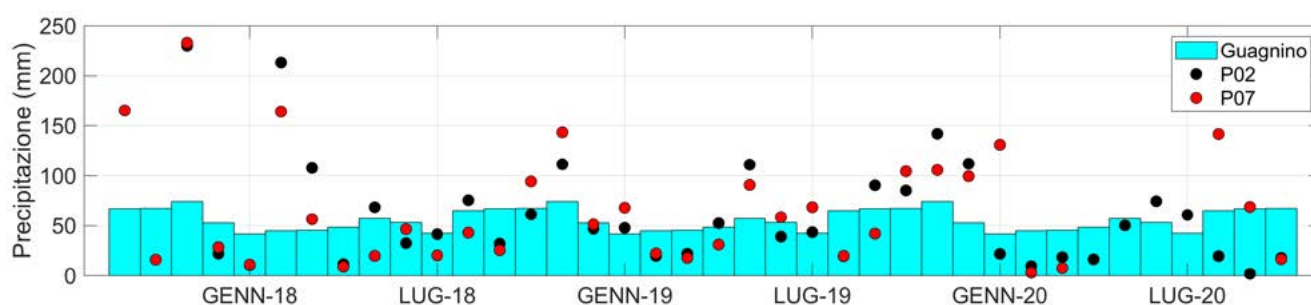
**Tabella 4.1.1.** - *Precipitazioni e temperature medie in due trentenni alla stazione di Guagnino*

**Table 4.1.1.** - *Average rainfall and temperature over two 30 year periods at the reference station of Guagnino*



Gli scostamenti quadratici medi dei singoli valori medi mensili, poco variabili nel corso dell'anno sono rispettivamente in media pari a 37,5 mm e 2,9 °C; pertanto le differenze fra i valori mensili dei due trentenni riportati in tabella sono significative al 95% solo se, singolarmente ed in valore assoluto, superano rispettivamente 19,4 mm e 1,5 °C. Se ne deduce che non c'è evidenza di cambiamenti nel regime delle precipitazioni, avendosi variazioni di segno opposto e, tutte tranne una, contenute nel limite indicato; le differenze di temperatura sono invece significative in quanto in tre mesi si supera la summenzionata soglia e tutti gli incrementi sono positivi. Ne risulta un incremento di temperatura nel trentennio di 1,0 °C, in linea con quanto generalmente stimato.

Nella figura 4.1.1 sono presentati i cumulati mensili rilevati alle due stazioni a confronto con i valori normali del periodo, assunti pari alla precipitazione media rilevata a Guagnino. Ne risultano alcuni mesi particolarmente piovosi: set-18, nov-18, mag-19 e dic-19. Altri particolarmente aridi: ott-17, gen-18, apr-18, feb-20, mar-20 e apr-20. Nel complesso se si considera la annata agronomica iniziante a ottobre, le precipitazioni dei tre anni monitorati risultano pari a 767, 687 e 738 mm, a fronte di precipitazioni annuali medie di 660 mm. Se limitiamo il confronto al trimestre irriguo giugno-agosto le precipitazioni occorse sono rispettivamente 130, 124 e 216 essendo quella normale nel periodo pari a 160 mm.

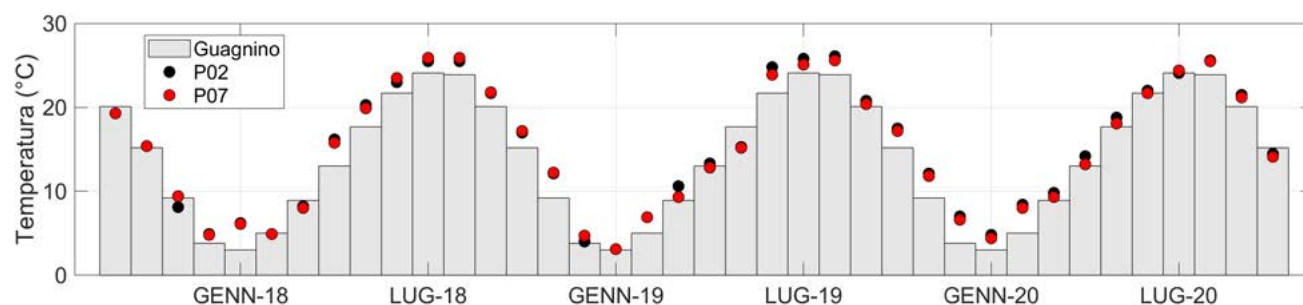


**Figura 4.1.1.** - Profilo temporale delle precipitazioni alle stazioni P02 e P07 a confronto con il profilo normale nell'area mutuato dalla stazione di Guagnino

**Figure 4.1.1.** - Rainfall temporal pattern at stations P02 and P07 compared with normal pattern in the area derived from Guagnino station

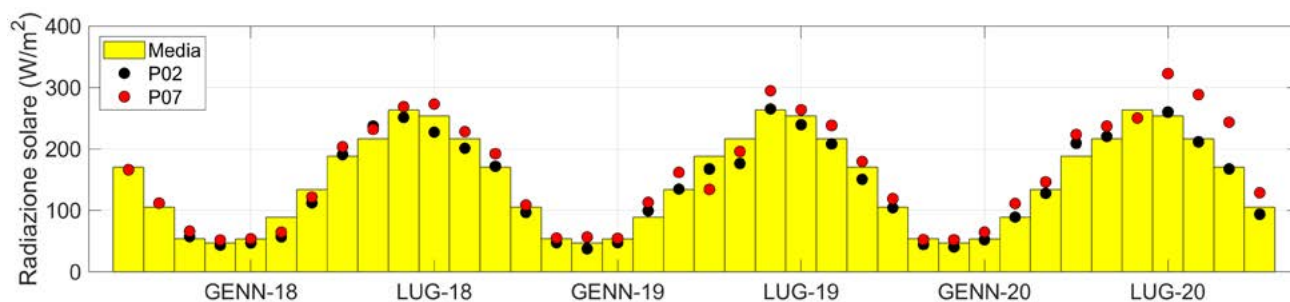
La figura 4.1.2 mostra le temperature medie mensili a fronte dei valori normali degli stessi mesi, in presenza di trend attribuibili all'anno centrale del

periodo: 1990. Ne emerge il riscaldamento medio di 1,0 °C nell'ultimo trentennio e scostamenti dalla norma molto contenuti.



**Figura 4.1.2.** - Profilo temporale delle temperature osservate alle stazioni P02 e P07 a confronto con il profilo normale nell'area mutuato dalla stazione di Guagnino

**Figure 4.1.2.** - Temperature temporal pattern at stations P02 and P07 compared with normal pattern in the area derived from Guagnino station.



**Figura 4.1.3.** - Profilo temporale della radiazione solare incidente al suolo osservata alle stazioni P02 e P07 a confronto con il profilo normale nell'area mutuato dal ciclo annuale medio alle stazioni stesse.

**Figure 4.1.3.** - Temporal pattern of incident solar radiation measured at station P02 and P07 compared with the normal annual pattern in the area derived from the same stations.

Temperature e radiazione solare mostrano con evidenza la presenza del ciclo delle stagioni. Merita osservare che gli estremi della radiazione solare si manifestano al solstizio, come minimo nella seconda metà di dicembre e massimo nella seconda metà di giugno. Gli estremi di temperatura si manifestano dopo circa un mese, a fine gennaio e fine luglio. La forte radiazione di giugno abbiamo visto essere dannosa per le colture seminate tardivamente, che, in quel mese, non hanno ancora radici profonde, mentre la forte radiazione essicca rapidamente gli

strati superficiali e per tradizione la irrigazione non comincia prima di metà giugno.

Nei tre anni di monitoraggio si è manifestata una anomalia idrologica nel mese di aprile, che è risultato in tutti gli anni arido, vuoi per aridità spiccata del singolo mese (apr-18), vuoi perché posto al termine di un trimestre (feb-mar-apr) alquanto arido negli anni '19 e '20, anche se il trimestre è per lo più compreso in un periodo di riposo vegetativo delle colture.

**4.2** - The subchapter describes the average condition of levels and salinity of the groundwater over the study area, the variation over time and the vertical stratification observed in relation to the irrigation practiced or not in the fields surrounding the observation points.

## 4.2. - EFFETTI DELLA IRRIGAZIONE SUI LIVELLI E LA SALINITÀ DELLE ACQUE DI FALDA

Alla sommaria demarcazione fra zone più o meno esposte alla salinizzazione fanno riscontro le salinità medie osservate ai piezometri. P01, P03 e P04 rientrano nella zona meno esposta, mentre i restanti P02 e da P05 a P09 rientrano nella zona più esposta. La tabella seguente presenta le caratteristiche medie rilevate ai piezometri. È bene ricordare anche che la zona più depressa, circostante i piezometri P02 e P05, era nell'800 una laguna salata; i suoli pertanto, in particolare negli strati profondi non interessati dal dilavamento superficiale dovuto a

precipitazione, irrigazione e drenaggi, contengono ancora sali di formazione.

E' necessario anche puntualizzare che nella zona più esposta alla salinizzazione sono stati realizzati in quasi tutti i campi drenaggi sotterranei con tubi posti alla profondità di 0,9-1,0 m d.p.c. e versanti nella rete di scola. Questi drenaggi hanno il duplice effetto di

- rimuovere l'acqua salmastra che risale in alcune zone soggiacenti il livello del mare e collegate tramite vene permeabili ai corpi d'acqua salata, e
- drenare le acque di pioggia nei periodi più piovosi, con l'effetto complessivo di mantenere il suolo agricolo

Piezometro	Livello del piano campagna, m s.m.	Livello medio della falda, m s.m.	Salinità media fino a -3,0 m s. p.c., dS/m
P01	0,07	-1,02	5,7
P02	-0,73	-1,90	35,6
P03	2,73	0,01	14,4
P04	0,19	-1,29	9,2
P05	-0,85	-1,86	23,9
P06	0,20	-0,83	22,6
P07	0,12	-1,79	23,3
P08	0,42	-1,03	18,4
P09			14,6

**Tabella 4.2.1.** - Condizioni medie ai piezometri desunte dai rilievi di stratificazione

**Table 4.2.1.** - Average conditions at piezometers derived from stratification surveys

superficiale in condizioni aerate e di salinità accettabile. La tabella mostra come l'acqua di falda non è idonea per l'irrigazione essendo troppo salina. I valori maggiori di salinità si hanno nelle zone più depresse, mentre i valori minori si hanno nei piezometri P01 e P04 che si trovano in zone alimentate da acque dolci: rispettivamente il Reno a monte di Voltascirocco e la valle della canna.

La figura 4.2.1 presenta il variare dei livelli e della salinità della falda durante il 2018 in alcuni piezometri significativi. Le escursioni annue di livello raramente superano il metro. Sono maggiori nei piezometri posti in campi non drenati come il P01 e il P03; i livelli massimi si verificano al termine della stagione invernale ed i minimi al termine della stagione estiva e rendono conto del marcato ciclo stagionale della evapotraspirazione. Nei campi dotati di drenaggio i livelli sono molto stabili. Spicca per salinità alta e costante il piezometro P02, in cui la falda si colloca poco sopra il livello dei dreni, a testimonianza di una falda salata che preme dal basso.

La figura 4.2.2 mostra l'andamento temporale dei livelli di falda nei piezometri P01 e P02, che, seppur vicini, hanno comportamenti molto diversi e rappresentativi delle due zone a diversa esposizione alla salinizzazione. P01

è posto in un campo non drenato con falda alimentata verosimilmente dal Reno attraverso terreni di debole permeabilità, quindi discretamente dolce ma a livelli fortemente variabili con la secchezza della stagione. P02 rappresenta una situazione fortunatamente non frequente di falda salata, alimentata da una vena profonda permeabile che ne spinge la superficie libera verso il livello del medio mare, ma stabilizzata dal drenaggio che rimuove l'acqua, sia questa risalga dal basso che percoli dalla superficie; la falda si mantiene sempre molto salata ed eccede il livello del drenaggio solo per brevi periodi di forti precipitazioni, durante i quali non sono stati effettuati rilievi di stratificazione.

Sono inoltre mostrate a confronto le stratificazioni saline rilevate ai piezometri P02 e P05. Quest'ultimo è posto al centro di un campo drenato nella zona maggiormente esposta alla salinizzazione ed irrigato normalmente con un pivot (impianto fisso di irrigazione con braccio rotante); il campo è soggetto a significative variazioni di livello e salinità della strato subsuperficiale, a dimostrazione che la falda salata sottostante è alimentata da una vena di bassa permeabilità.

L'ingressione del sale nell'area risulta particolar-

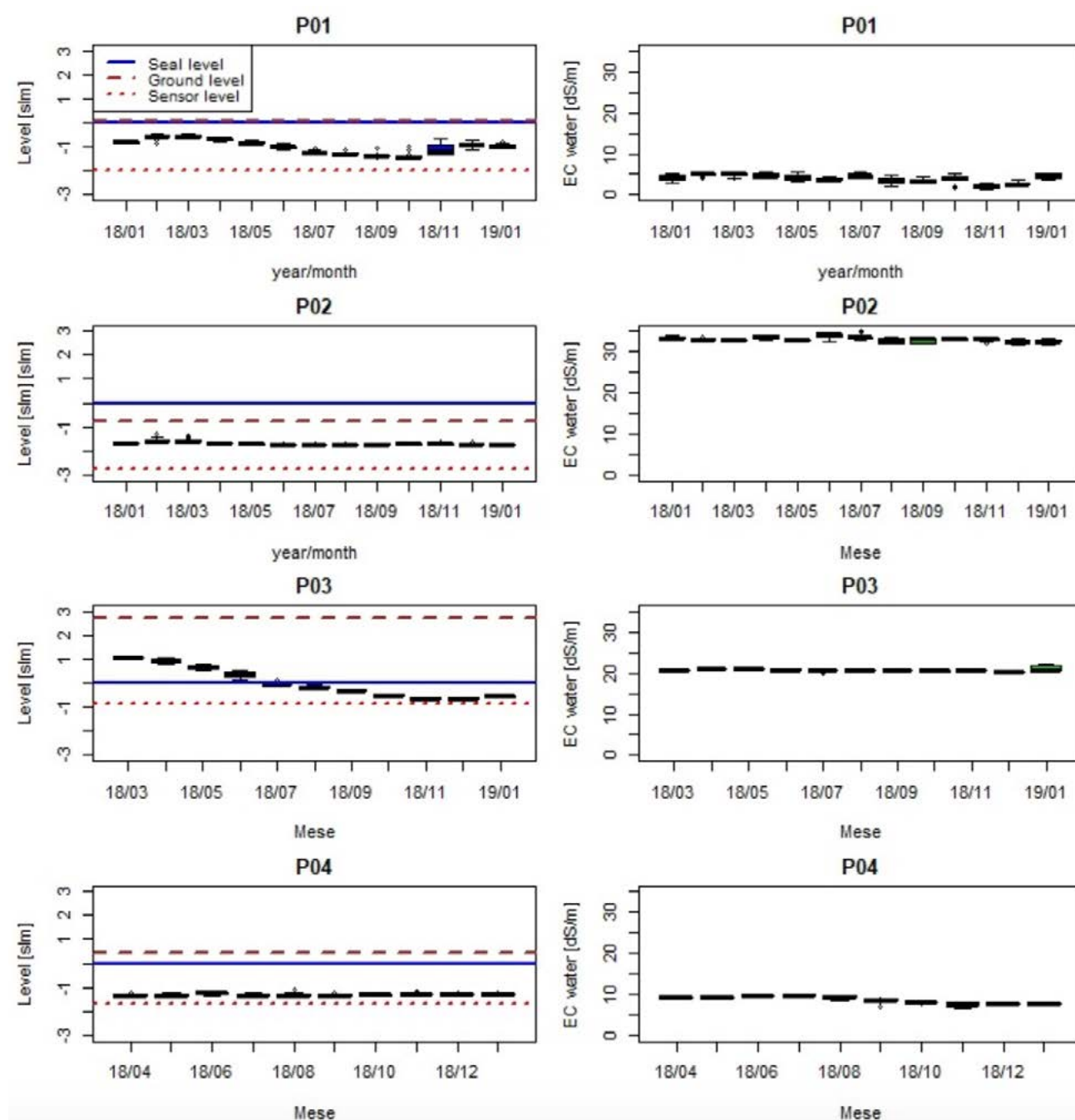


Figura 4.2.1. - Boxplot mensili dei livelli e della salinità nel 2018 per 4 piezometri della rete.

Figure 4.2.1. - Monthly boxplot of levels and salinity in 2018 for 4 piezometers of the network.

mente evidente a scala comprensoriale nei periodi invernali di scarsa precipitazione, quando i canali sono normalmente vuoti e nessuno irriga. Nei periodi estivi secchi ed in assenza di irrigazione, quindi in misura difforme da campo a campo, lo strato di acqua dolce superficiale si assottiglia o scompare del tutto per effetto della forte evaporazione, lasciando risalire l'acqua salata.

La complessa dinamica della falda è ben rappresentata da quanto è accaduto nello squadro 4 Bio-Marcabò dotato di un sistema di drenaggio sotterraneo ed irrigato con pivot a fianco del quale è posto il piezometro P05. La falda mostra (vedi figure 4.2.2 e 4.2.3) una evidente stratificazione che separa le acque dolci di origine pluviale o irrigua dalla sottostante acqua salata.



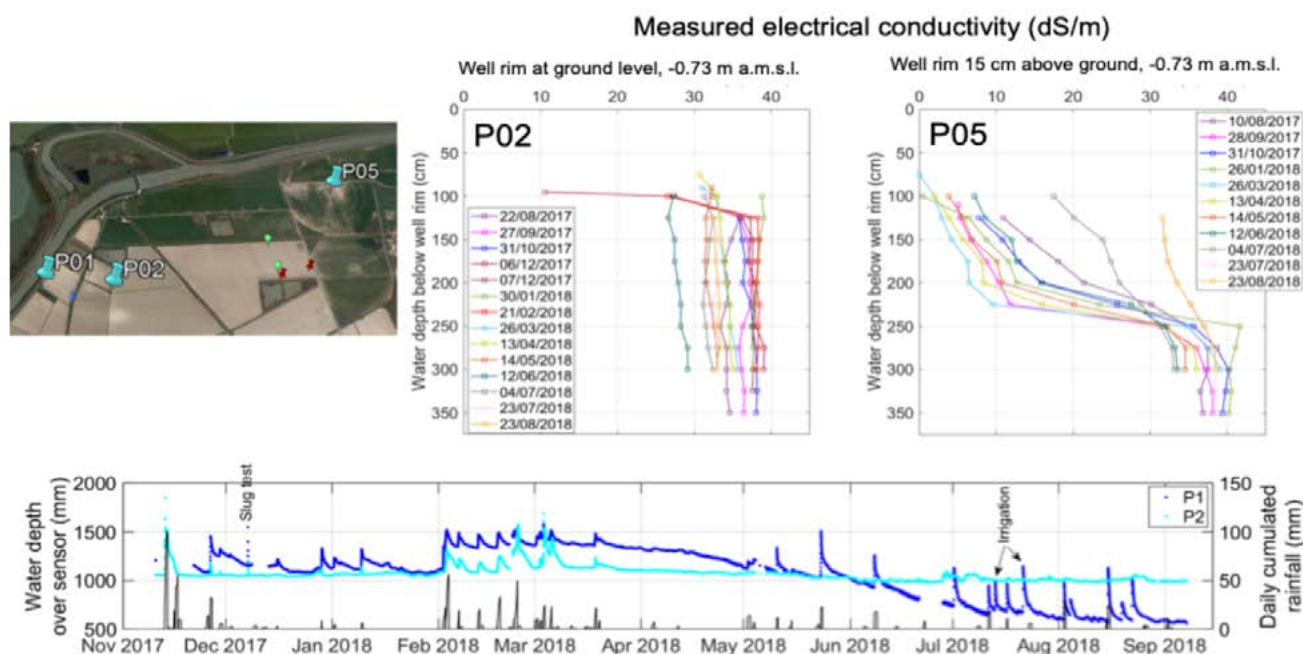
Questo campo è stato coltivato a

- mais nella la stagione 2017 (semina 13/04, raccolto 01/08),
- orzo nella stagione 2018, con mietitura a Giugno e campo lasciato incolto nell'estate,

- soia nel 2019 (semina 25/05, raccolto 30/09).

Gli interventi irrigui sono stati eseguiti con il pivot centrale distribuendo i seguenti volumi d'acqua:

- per il mais 94 mm nella stagione così suddivisi:



**Figura 4.2.2.** - Anno colturale 2017-18, andamento temporale dei livelli di falda nei piezometri P01 e P02, e distribuzione verticale della salinità nei piezometri P02 e P05.

**Figure 4.2.2.** - Crop year 2017-18, time course of groundwater levels in P01 and P02 piezometers, and vertical distribution of salinity in P02 and P05 piezometers.

15 mm il 03/06/2017, 17 mm il 12/06/2017, 17 mm il 23/06/2017, 20 mm il 06/07/2017 e 25 mm il 15/07/2017;

- l'orzo non è stato irrigato;

- per la soia 47 mm nella stagione così suddivisi: 10 mm il 05/06/2019, 12 mm il 10/06/2019, 12 mm il 13/06/2019 e 13 mm il 19/06/2019.

La figura 4.2.2. documenta la vicenda dell'anno colturale 2017-18. Il primo profilo del 10/08/2017 rappresenta la situazione al termine della stagione irrigua precedente in cui si è coltivato mais. Nel successivo autunno-inverno 2017-18, relativamente piovoso, si è formato uno strato superiore di acqua praticamente dolce, particolarmente evidente a fine Marzo, con interfaccia a profondità -2,40 m s.p.c..

Ad Aprile ancora lo strato superficiale di acqua dolce è chiaramente visibile, mentre nei mesi successivi in carenza di precipitazioni e assenza di irrigazioni lo strato dolce superficiale è stata prosciugata dalla evaporazione. La superficie libera è scesa da -0,8 m s.p.c di Marzo a -1,3 m s.p.c. a fine Luglio, ma soprattutto è risalita la falda salata sottostante fino alla superficie libera. I rilievi del 2019 in Figura 4.2.3 mostrano il 10/4/2019 un profilo primaverile successivo ad un inverno abbastanza secco, mentre le abbondanti piogge di Maggio 2019 e le successive irrigazioni di Giugno hanno determinato una potenza dello strato superiore di acqua dolce di oltre 2 m con interfaccia di separazione acqua dolce/salata a circa 3,0 m da bocca pozzo. Successivamente, in

assenza di apporti irrigui, lo spessore dello strato di acqua dolce va progressivamente riducendosi e l'interfaccia di separazione risale verso il piano campagna, determinando valori di salinità un po' più elevati nello strato superficiale, ma assai minori che nel 2018.

Questa variabilità si ripete in modo più o meno irregolare in tutta l'area e in tutti gli anni, sotto l'effetto del ciclo stagionale abbastanza regolare dell'evaporazione, combinato però con l'avvicendamento irregolare delle precipitazioni irregolari e la rotazione di colture irrigue e non irrigue indipendente dalle precipitazioni.

La figura 4.2.3. mostra anche il comportamento di un campo non irrigato nella azienda Baronica ove è posto il piezometro P08. Anche qui è evidente la stratificazione con minor variabilità in quanto manca la alternanza di colture irrigate e non irrigate.

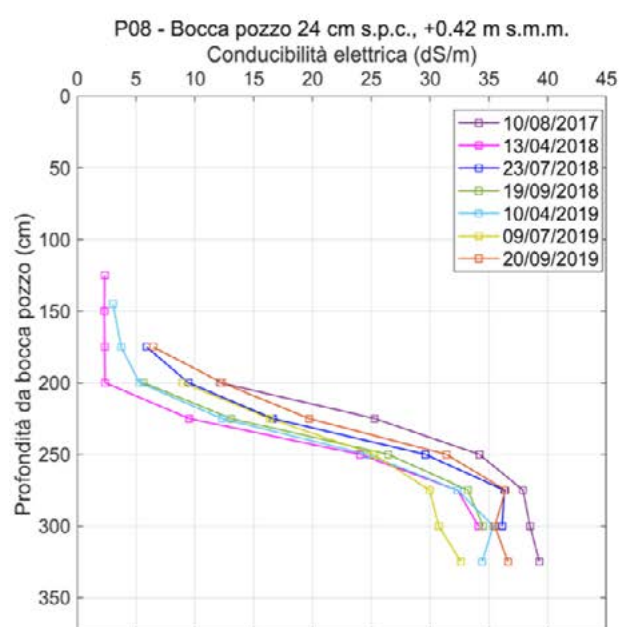
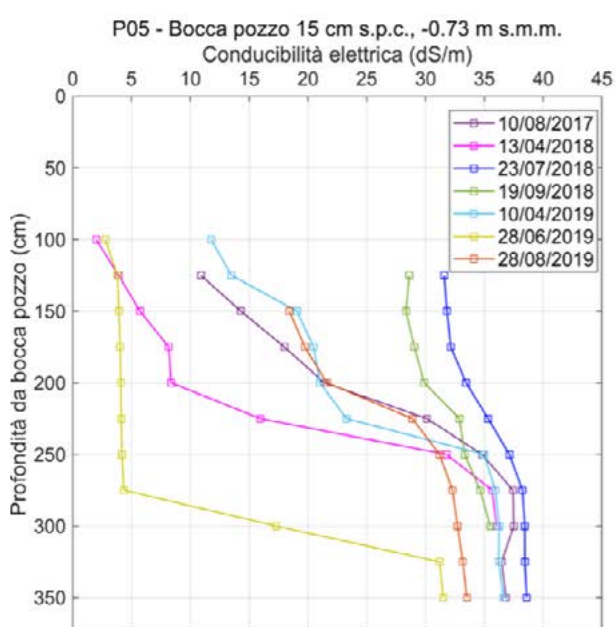
La figura 4.2.4 mostra la variabilità delle caratteristiche della falda sui tre anni di monitoraggio nei due piezometri P05 e P08. La distribuzione è

rappresentata:

- dalle quote della superficie libera e dell'interfaccia fra acqua 'dolce' e salata e
- dalla salinità degli strati superiore ed inferiore.

Si può notare come

- la salinità del corpo inferiore è molto alta, variabile fra 30 e 40 dS/m, non lontana da quella del mare; quella del corpo superiore è normalmente minore di 10 dS/m, compatibile con colture tolleranti, salvo superare questo valore quando la potenza dello strato va riducendosi a zero (P05 Settembre 2019);
- le due quote variano in opposizione di fase, come avverrebbe in condizioni di equilibrio con un corpo idrico statico, come potrebbe essere il mare, collegato tramite un condotto profondo, ma il rapporto di ampiezza delle due oscillazioni è circa 1:1, a fronte di un rapporto fra le ampiezze della superficie libera e dell'interfaccia di 1:40 circa, che si avrebbe in condizioni di equilibrio statico fra vasi comunicanti, a prova che la connessione col mare ha una conducibilità modesta.



**Figura 4.2.3.** - Andamento della salinità al variare della profondità da bocca pozzo ai piezometri P05 e P08 per alcuni rilievi eseguiti durante il periodo di monitoraggio del progetto.

**Figure 4.2.3.** - Salinity trend as the depth varies from the well mouth to the P05 and P08 piezometers for some surveys carried out during the project monitoring period.

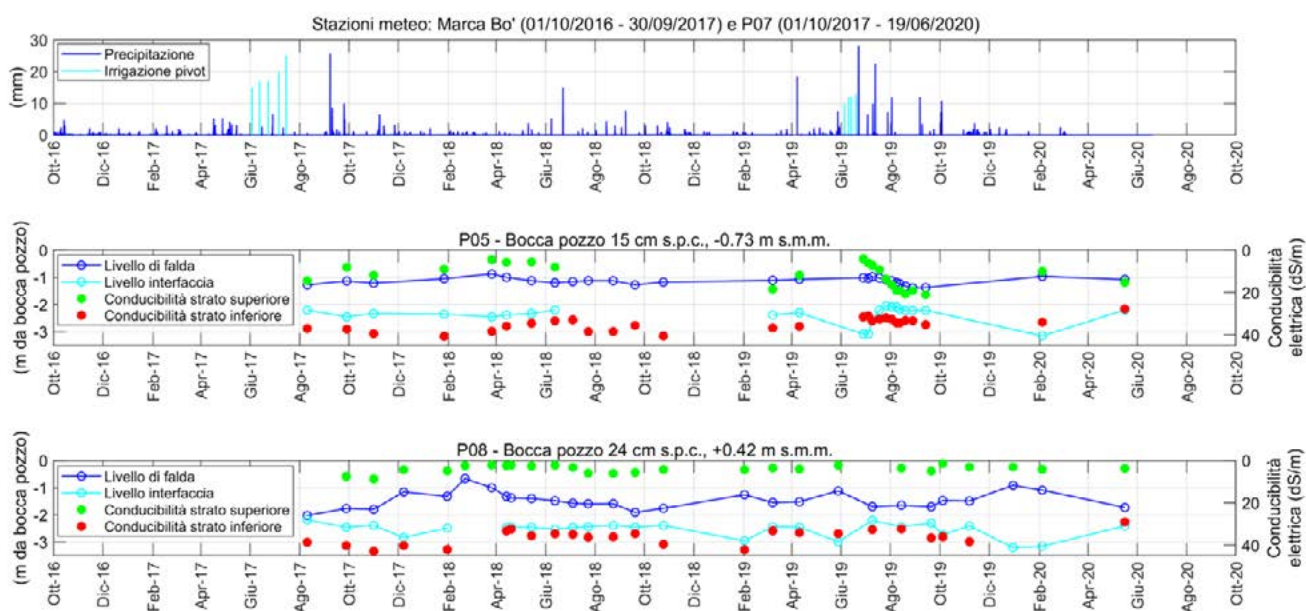
La maggior quota della falda freatica e la minor salinità si sono raggiunte al termine della primavera 2018 per effetto delle precipitazioni invernali e primaverili e nel giugno 2019 per effetto delle irrigazioni. La massima salinità della lente superficiale si manifesta a fine estate, quando le irrigazioni sono terminate da tempo e prima che si verifichino le precipitazioni autunnali.

In conclusione l'acquifero sabbioso composto da antiche spiagge e dune costiere contiene una falda d'acqua salmastra verosimilmente alimentata dal mare che si incunea sotto una falda sub-superficiale alimentata dalla percolazione delle acque di precipitazione o di irrigazione.

L'interfaccia ha una quota media intorno a -2,0 m s.m. vicino al perimetro di alimentazione (piezometri P02, P06, P08); al centro dell'area (piezometri P05, P07) l'interfaccia si porta a profondità maggiori fino a raggiungere -3.0 m s.m. in P05. Più ad Ovest, nell'entroterra, la falda salata non è osservabile nei piezometri.

Il corpo d'acqua 'dolce' superiore richiede, soprattutto nelle zone soggiacenti il mare, un contributo della irrigazione per contrastare l'effetto della risalita del sale unitamente all'acqua sottostante, ove questa risale, o l'effetto meno intenso della dispersione della salinità nei suoli associata alle fluttuazioni della superficie libera.

Nell'area le irrigazioni sono praticate solo nel periodo estivo per compensare la forte evapotraspirazione. Non vengono praticate invece nei periodi invernali secchi, frequenti nel periodo di monitoraggio, a sostegno della naturale lisciviazione invernale. Ai fini di contrastare la salinizzazione dei suoli e stante la modestissima evaporazione invernale, questi interventi potrebbero risultare efficaci sui suoli argillosi di quest'area anche se di intensità molto minore rispetto alle irrigazioni estive.



**Figura 4.2.4.** - Andamento temporale dei livelli della superficie libera e dell'interfaccia fra acqua dolce ed acqua salata nei due piezometri P05 e P08; il primo è in un campo irrigabile tramite pivot ma non irrigato nel 2018, il secondo è collocato in un campo non irrigabile.

**Figure 4.2.4.** - Temporal trend of the levels of the free surface and of the interface between fresh and salt water in the two piezometers P05 and P08; the first is in a field that can be irrigated by pivot but not irrigated in 2018, the second is located in a non-irrigable field.

**4.3. -** Water flow in the channel network is described with attention to the winter drainage and summer irrigation regimes; particular attention is paid to water salinity.

### **4.3. - REGIME DELLE PORTATE E DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE NEI CANALI DI BONIFICA**

A partire dal 2018, i 69 Km di canali, costituenti la quasi totalità del reticolo del comparto idraulico "Savarna-Sant'Alberto-Mandriole" in gestione al Consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, sono stati monitorati mediante l'installazione di 11 idrometri (vedi fig. 2.9.1) collocati in punti significativi della rete (canali, wetland, etc). Ciò ha consentito di monitorare in tempo reale lo stato della rete in termini di tiranti idrici e conducibilità elettrica.

Il regime delle portate nei canali è controllato artificialmente dal Consorzio. I canali durante la stagione invernale vengono tenuti "in secca" mediante l'attivazione continua e automatica degli impianti idrovori.

A partire dal mese di marzo il consorzio prepara la rete ad assolvere le funzioni irrigue operando alcuni lavaggi e riempiendo infine artificialmente il reticolo con acqua di buona qualità ( $EC \ll 4$  dS/m). Mantiene così invasati canali fino a fine ottobre, salvo quando sono preannunciate forti precipitazioni.

La Figura 4.3.1 illustra, a titolo esemplificativo, i dati di monitoraggio degli idrometri I02, I08 e I03.

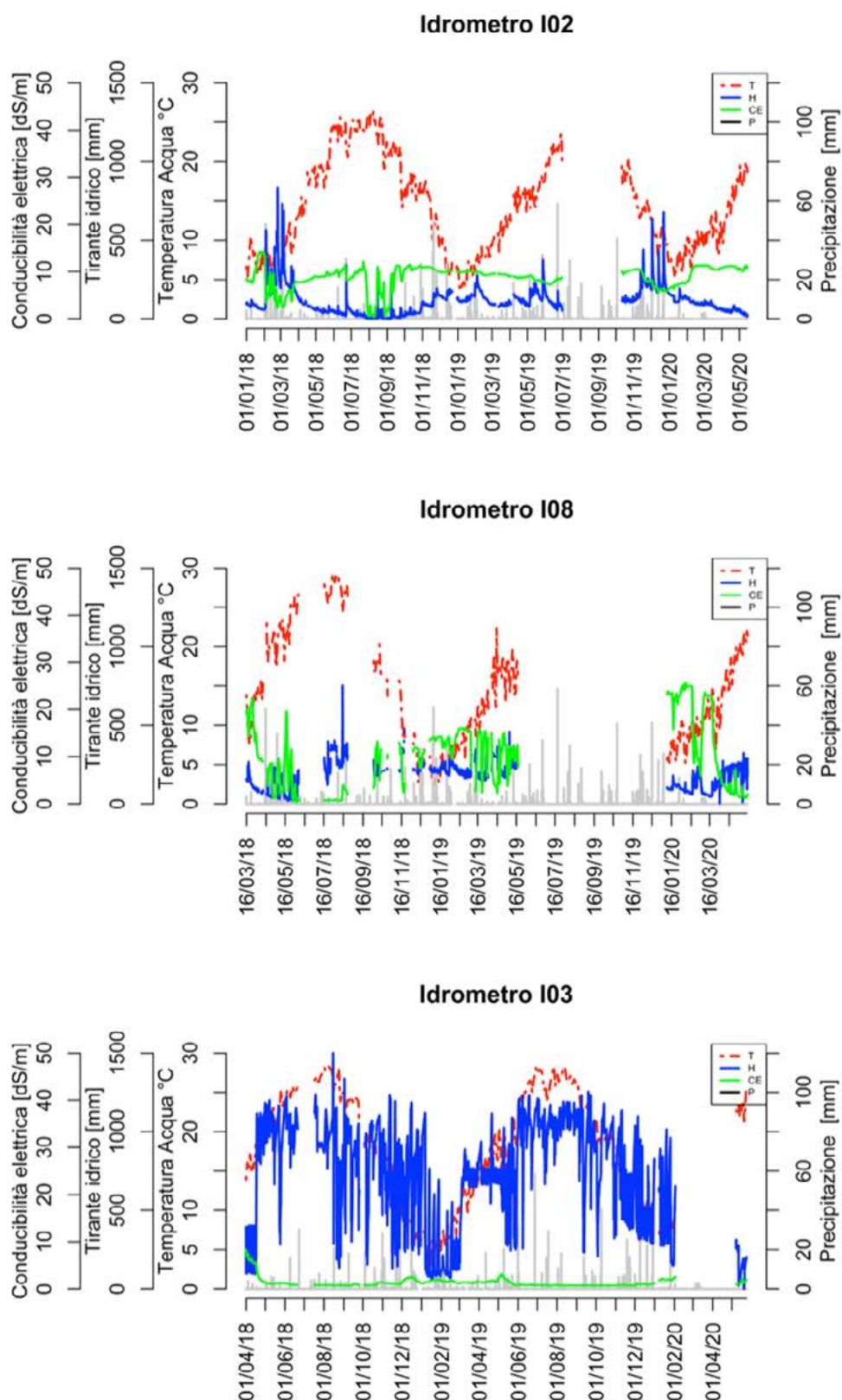
L'idrometro I02, collocato in corrispondenza del canale Trasversale Busona ramo nord è un canale con funzione prevalentemente di scolo che talvolta, in periodo estivo, è

percorso in contropendenza dall'acqua irrigua proveniente dalla canaletta Mandriole. Quando questo accade la conducibilità elettrica, che mediamente registra valori superiori a 8 dS/m, subisce un brusco abbattimento a 1-2 dS/m.

L'idrometro I08, collocato in corrispondenza del canale Trasversale Busona ramo sud durante il periodo invernale raccoglie le acque di scolo dei campi circostanti e i valori di conducibilità elettrica sono sempre superiori a 10 dS/m. In periodo irriguo, il canale è alimentato in modo intermittente dalla Canaletta Mandriole con acqua di buona qualità proveniente dall'opera di presa irrigua situata a monte della traversa di Voltascirocco. Ciò determina l'abbassamento dei valori di EC anche sotto 1 dS/m.

L'idrometro I03, situato sul canale Rivalone in prossimità della tenuta Augusta, è caratterizzato da valori dei tiranti idrici che oscillano nel range 0.10-1.5 m. Tale variazione è imputabile in primo luogo all'immissione, durante il periodo irriguo, di acqua dolce proveniente dal CDR e in secondo luogo, all'attivazione dell'impianto Idroforo Secondo Bacino Casal Borsetti, situato qualche km più a valle. In generale l'acqua presenta dei valori di conducibilità elettrica di poco superiori ai 4 dS/m durante il periodo invernale mentre durante entrambe le stagioni irrigue monitorate i valori di EC misurati sono intorno a 1 dS/m.





**Figura 4.3.1.** - Alcuni risultati del monitoraggio del sistema Agrowetlands II. Temperatura media giornaliera (T, linea rossa), tirante idrico medio orario (H, linea blu), conducibilità elettrica media oraria (CE, linea verde), precipitazione cumulata giornaliera (linea grigia) per i nodi nel titolo.

**Figure 4.3.1.** - Agrowetlands II monitoring results. Daily average temperature (T, red line), hourly average water depth (H, blue line), daily accumulated precipitation (gray line) recorded by mentioned WSN nodes.

La figura 4.3.2 mostra in forma di box-plot mensili la distribuzione della salinità nel complesso dei canali della rete. Si possono notare alcuni comportamenti simili. I05, I03 sono idrometri posti sul canale Rivalone; I01 e I10 fanno parte della rete che scola la parte occidentale dell'area, a terra dell'idrovora; da monte arriva acqua di colature avente però qualità discreta, più salina d'inverno ma d'estate sostanzialmente idonea per l'irrigazione. I02, I08 e I07 sono disposti su canali che drenano l'area compresa fra la duna litorale attuale e quella medioevale; sono canali che drenano acque salmastre dalla porzione superiore della falda; d'estate sono raggiunti in contropendenza da acque irrigue di qualità discreta che temporaneamente ne abbassano la salinità dell'acqua. I09, posto al termine del canale Busona evidenzia una situazione di forte salinizzazione, con salinità delle acque che possono raggiungere valori estremamente elevati, di norma in assenza di pompaggio alla idrovora. Tali valori possono ascrivere all'affioramento sul fondo di vene d'acqua salata alimentate verosimilmente dalle valli di Comacchio, accentuate forse dal ristagno di acqua salata sul fondo del canale quando l'impianto idrovoro è fermo.

In generale è emerso che la quasi totalità dei canali monitorati durante la stagione invernale presenta bassi tiranti idrici in tempo secco che tendono a crescere immediatamente dopo gli eventi meteorici. La conducibilità elettrica per contro, risulta avere un comportamento diametralmente opposto: alti valori in tempo secco ( $EC \gg 4 \text{ dS/m}$ ), che si riducono dopo gli eventi meteorici. Durante il periodo estivo i tiranti idrici sono mantenuti artificialmente alti nei canali mediante il pompaggio in rete di acqua proveniente dal fiume Reno o dal Canale di Bonifica Destra Reno. Tuttavia, la primaria funzione di scolo di tali opere comporta la necessità di vigilare costantemente sul mantenimento delle condizioni di sicurezza idraulica. A titolo precauzionale quindi, in occasione di allarmi meteo emanati dalla protezione civile durante la stagione irrigua, il reticolo viene completamente svuotato. Tale pratica mal si concilia con la gestione irrigua dell'azienda Agrisfera che spesso viene fatta mediante un 'rotolone' con tempi che oscillano da due a cinque-sei giorni in relazione dell'estensione del campo.

Nel dettaglio, in occasione della stagione irrigua 2019, durante l'irrigazione a rotolone in "closed loop mode" prevista dal sistema Smart Agrowetlands II, nei giorni 10-11 Luglio 2019 a causa di un allarme meteo i canali sono stati svuotati e ciò ha causato nel campo prova sperimentale un'interruzione dell'irrigazione programmata. Nella realtà la perturbazione meteorica non ha generato precipitazioni e pertanto lo svuotamento dei canali non solo ha compromesso la gestione dell'irrigazione ma ha anche determinato una spesa per il consorzio (svuotamento e successivo riempimento dei canali).

L'inserimento della rete di monitoraggio Smart Agrowetlands all'interno di un sistema di controllo e gestione in tempo reale degli organi idraulici della rete di bonifica consentirebbe di ottimizzare sia le capacità di invaso della rete stessa e quindi le ore di funzionamento degli impianti idrovori, sia i volumi di acqua dolce immessi in rete durante la stagione irrigua per ridurre la salinità dell'acqua nei canali.

In generale è emerso che la quasi totalità dei canali monitorati durante la stagione invernale presenta bassi tiranti idrici in tempo secco che tendono a crescere immediatamente dopo gli eventi meteorici. La conducibilità elettrica per contro, risulta avere un comportamento diametralmente opposto: alti valori in tempo secco ( $EC \gg 4 \text{ dS/m}$ ), che si riducono dopo gli eventi meteorici. Durante il periodo estivo i tiranti idrici sono mantenuti artificialmente alti nei canali mediante il pompaggio in rete di acqua proveniente dal fiume Reno o dal Canale di Bonifica Destra Reno. Tuttavia, la primaria funzione di scolo di tali opere comporta la necessità di vigilare costantemente sul mantenimento delle condizioni di sicurezza idraulica. A titolo precauzionale quindi, in occasione di allarmi meteo emanati dalla protezione civile durante la stagione irrigua, il reticolo viene completamente svuotato. Tale pratica mal si concilia con la gestione irrigua dell'azienda Agrisfera che spesso viene fatta mediante un 'rotolone' con tempi che oscillano da due a cinque-sei giorni in relazione dell'estensione del campo.

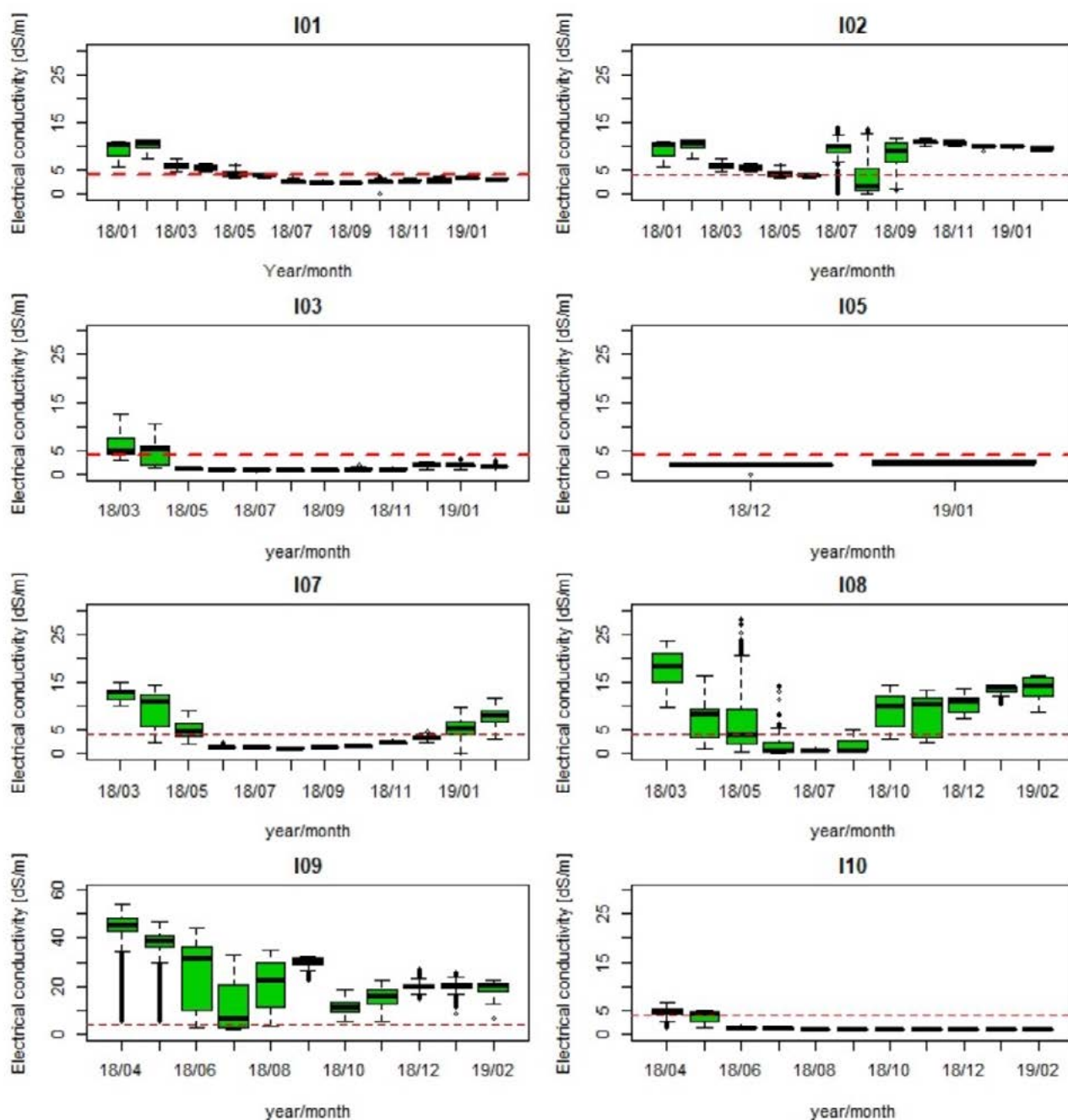


Figura 4.3.2. - Boxplot mensili della salinità nella rete scolante per l'anno 2018

Figure 4.3.2. - Monthly boxplot of salinity in the drainage network for the year 2018

In generale è emerso che la quasi totalità dei canali monitorati durante la stagione invernale presenta bassi tiranti idrici in tempo secco che tendono a crescere immediatamente dopo gli eventi meteorici. La conducibilità elettrica per contro, risulta avere un comportamento diametralmente opposto: alti valori in tempo secco ( $EC \gg 4 \text{ dS/m}$ ), che si riducono dopo gli eventi meteorici. Durante il periodo estivo

i tiranti idrici sono mantenuti artificialmente alti nei canali mediante il pompaggio in rete di acqua proveniente dal fiume Reno o dal Canale di Bonifica Destra Reno. Tuttavia, la primaria funzione di scolo di tali opere comporta la necessità di vigilare costantemente sul mantenimento delle condizioni di sicurezza idraulica. A titolo precauzionale quindi, in occasione di allarmi meteo emanati dalla protezio-

ne civile durante la stagione irrigua, il reticolo viene completamente svuotato. Tale pratica mal si concilia con la gestione irrigua dell'azienda Agrisfera che spesso viene fatta mediante un 'rotolone' con tempi che oscillano da due a cinque-sei giorni in relazione dell'estensione del campo.

Nel dettaglio, in occasione della stagione irrigua 2019, durante l'irrigazione a rotolone in "closed loop mode" prevista dal sistema Smart AgrowetLnds II, nei giorni 10-11 Luglio 2019 a causa di un allarme meteo i canali sono stati svuotati e ciò ha causato nel campo prova sperimentale un'interruzione dell'irrigazione programmata. Nella realtà la pertur-

bazione meteorica non ha generato precipitazioni e pertanto lo svuotamento dei canali non solo ha compromesso la gestione dell'irrigazione ma ha anche determinato una spesa per il consorzio (svuotamento e successivo riempimento dei canali).

L'inserimento della rete di monitoraggio Smart Agrowetlands all'interno di un sistema di controllo e gestione in tempo reale degli organi idraulici della rete di bonifica consentirebbe di ottimizzare sia le capacità di invaso della rete stessa e quindi le ore di funzionamento degli impianti idrovori, sia i volumi di acqua dolce immessi in rete durante la stagione irrigua per ridurre la salinità dell'acqua nei canali.



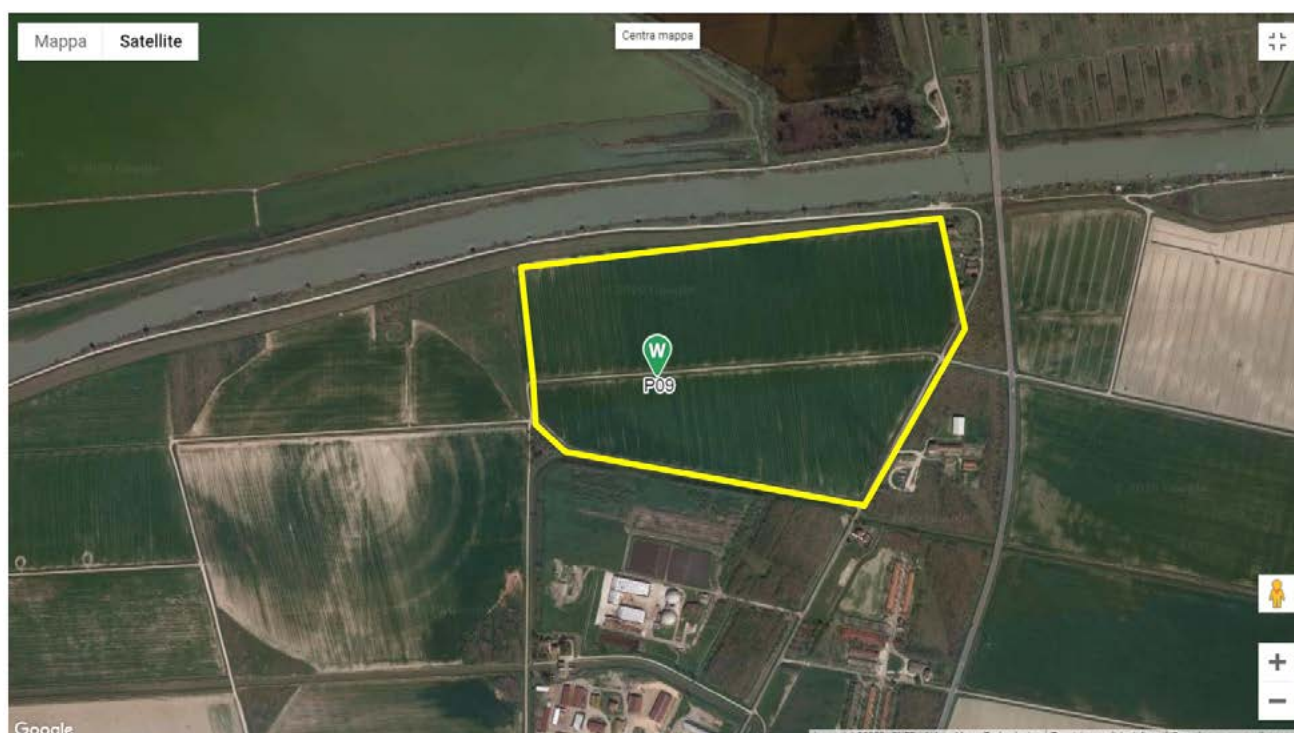
**4.4. -** In 2019 the Smart Agrowetland Decision Support System was first applied to manage maize irrigation in the Biomarcabò farm. The DSS, based on the FAO's AquaCrop model, used weather forecasts and environmental data collected by the Wireless Sensor Network installed in the area. Two different irrigation criteria were compared, postulating a water salinity not exceeding  $4.8 \text{ dS m}^{-1}$ , the first aimed at providing leaching of salts through over-irrigation (SL) and the second aimed at reducing water consumption (WS). According to the DSS, the plants

suffer a greater salt stress under the SL rather than the WS criterion. This plausibly because the application of excess water does not contribute to the removal of salts through a commensurate drainage volume but, rather, it promotes their detrimental accumulation. The model predicted correctly the phenological stages' duration and the harvest date but overestimated the dry yield that was, for both the criteria, of about  $19 \text{ t ha}^{-1}$ , against the real one of  $11.4 \text{ t ha}^{-1}$ .

#### 4.4. - EFFETTI SULLE COLTURE

Nell'anno 2019 è avvenuta la prima applicazione del sistema di supporto alle decisioni Smart Agrowetland, elaborato a partire del modello AquaCrop della FAO. Il modello ha utilizzato le previsioni meteo provenienti da Open Weather

Map e i dati ambientali raccolti dalla Rete Wireless di Sensori installata nell'area. L'area di applicazione del DSS è lo squadro No. 5 dell'azienda Biomarcabò (Fig 4.4.1), dove è stato seminato Mais P1517W della Pioneer il 23/05/2019.



**Figura 4.4.1. -** Squadro 5 dell'azienda agricola Biomarcabò, immagine Google Earth del 2 apr 2018

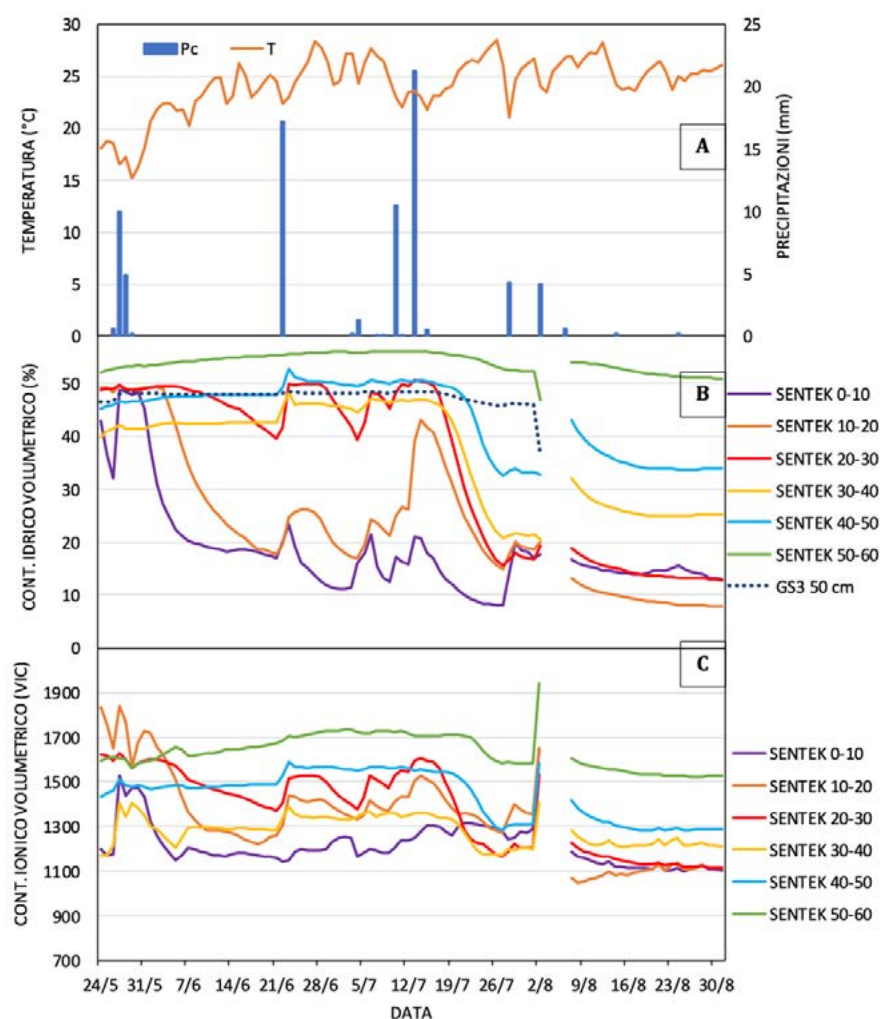
**Figure 4.4.1. -** Field no. 5 of the Biomarcabò farm, Google Earth image dated 4/2/2018

L'andamento delle temperature e delle precipitazioni occorre in quest'area durante la stagione colturale sono riassunte in Figura 4.4.2A mentre l'andamento dell'umidità e della salinità del suolo nei primi 6 strati, ciascuno dallo spessore di 10 cm, è schematizzato in 2B.

In Figura 4.4.3, invece, sono riportate le rette di regressione tra le misure di salinità e umidità del terreno eseguite dalla sonda SENTEK (strati 40-50 e 50-60 cm) e GS3 (posizionata ad una profondità di circa 50 cm) rispettivamente. C'è da precisare che le due sonde riportano il dato di salinità del terreno in due diverse unità di misura: la sonda SENTEK restituisce un dato in termini di "Volumetric Ion Content (VIC)" mentre la sonda GS3 un dato di "bulk

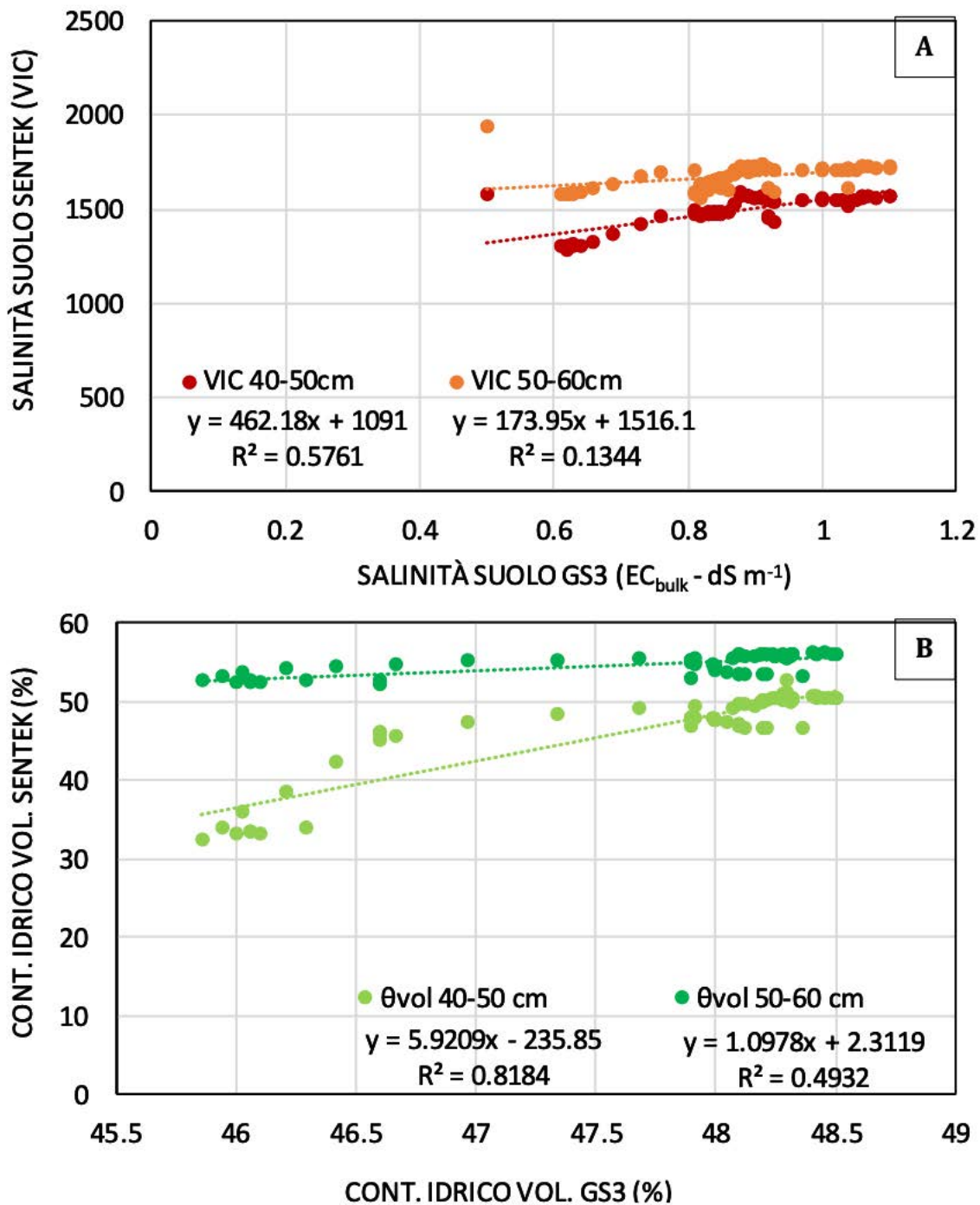
electrical conductivity ( $EC_{bulk}$ )", ossia la conduttività elettrica della massa di suolo, acqua e aria che circondano la sonda. La lettura eseguita dal GS3 (50 cm) mostra una buona correlazione ( $R=75$ ,  $n-1=69$ ) con la lettura SENTEK dello strato 40-50 cm e una correlazione più bassa con la misura effettuata nello strato successivo 50-60 cm ( $R=36$ ,  $n-1=69$ ).

Per quanto riguarda, invece, la misura del contenuto idrico volumetrico, la lettura GS3 mostra una elevata correlazione sia con la misura SENTEK eseguita nello strato 40-50 cm ( $R=0.90$ ,  $n-1=69$ ) che nello strato 50-60 cm ( $R=0.70$ ,  $n-1=69$ ), e ancora una volta la correlazione si dimostra superiore con lo strato 40-60 piuttosto che con il successivo più profondo.



**Figura 4.4.2.** - Andamento di A) temperatura e precipitazioni, B) contenuto idrico volumetrico del suolo nei primi strati di terreno, ciascuno spesso 10 cm e C) contenuto ionico volumetrico del suolo del suolo nei primi strati di terreno, ciascuno spesso 10 cm, nello squadro 5 del Biomarcabò.

**Figure 4.4.2.** - Daily pattern of A) temperature and precipitation, B) soil volumetric water content in the first six layers, each 10 cm thick and C) soil volumetric ion content in the six first layers of soil, each 10 cm thick, in the field no. 5 of the Biomarcabò farm.



**Figura 4.4.3.** - Rete di regressione tra A) la misura di salinità effettuata dalla sonda GS3 ( $EC_{bulk}$  in  $dS m^{-1}$ ) e quella effettuata dalla sonda SENTEK (VIC, Volumetric Ion Content) e B) la misura del contenuto idrico volumetrico effettuata dalla sonda GS3 (%) e quella effettuata dalla sonda SENTEK agli strati 40-50 cm e 50-60 cm di terreno.

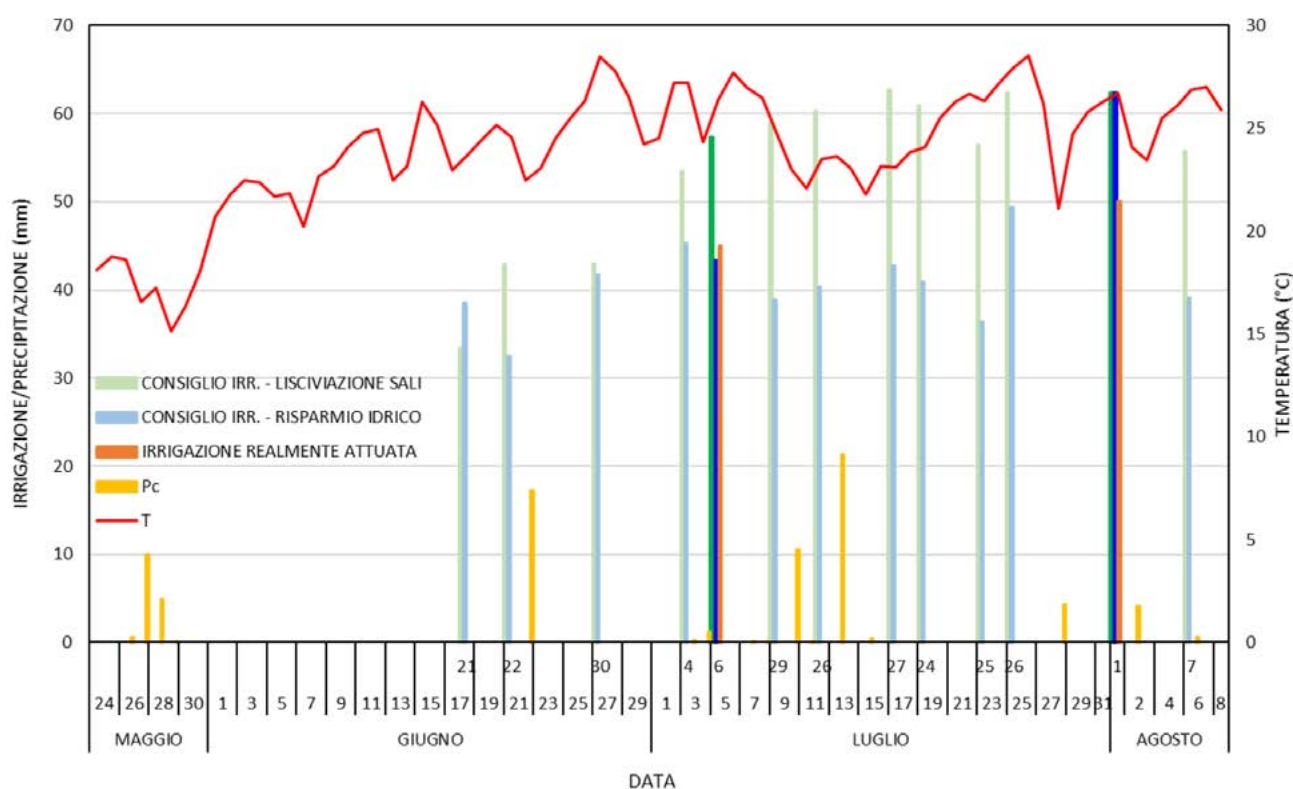
**Figure 4.4.3.** - Regressions lines between A) the salinity measurements performed by the GS3 probe ( $dS m^{-1}$ ) and that performed by the SENTEK probe (VIC) and, B) the volumetric water content measurements performed by the GS3 probe (%) and that performed by the SENTEK probe (%), at about 50 cm depth.

Si è deciso di confrontare due diversi criteri per l'applicazione del DSS e la generazione del consiglio irriguo: uno volto a ridurre il rischio di salinizzazione del terreno (istogramma verde) e l'altro teso a ridurre i

consumi idrici (istogramma celeste). In entrambi i casi si è postulato che l'acqua non superasse un livello di salinità pari a  $4.8 \text{ dS m}^{-1}$ . I consigli generati sono schematizzati in figura 4 dove troviamo sulla

riga superiore dell'asse delle ascisse le date in cui il DSS suggerisce di eseguire il consiglio irriguo mentre sulla riga inferiore le date in cui il DSS ha emesso il consi-

glio irriguo. La figura mostra altresì le irrigazioni realmente applicate (istogrammi arancioni), le quali sono state registrate nel DSS in modo che il modello ne abbia potuto tenere conto. È bene chiarire che il DSS Smart Agrowetlands ha fornito dei suggerimenti irrigui in maniera previsionale, basandosi sulle previsioni meteorologiche e le previsioni di sviluppo fenologico della coltura; spesso, tuttavia, in seguito all'emissione del consiglio si sono verificate delle precipitazioni associate a cali delle temperature, che hanno ottemperato al fabbisogno idrico della coltura annullando l'esigenza di una irrigazione che, pertanto, non è stata eseguita.



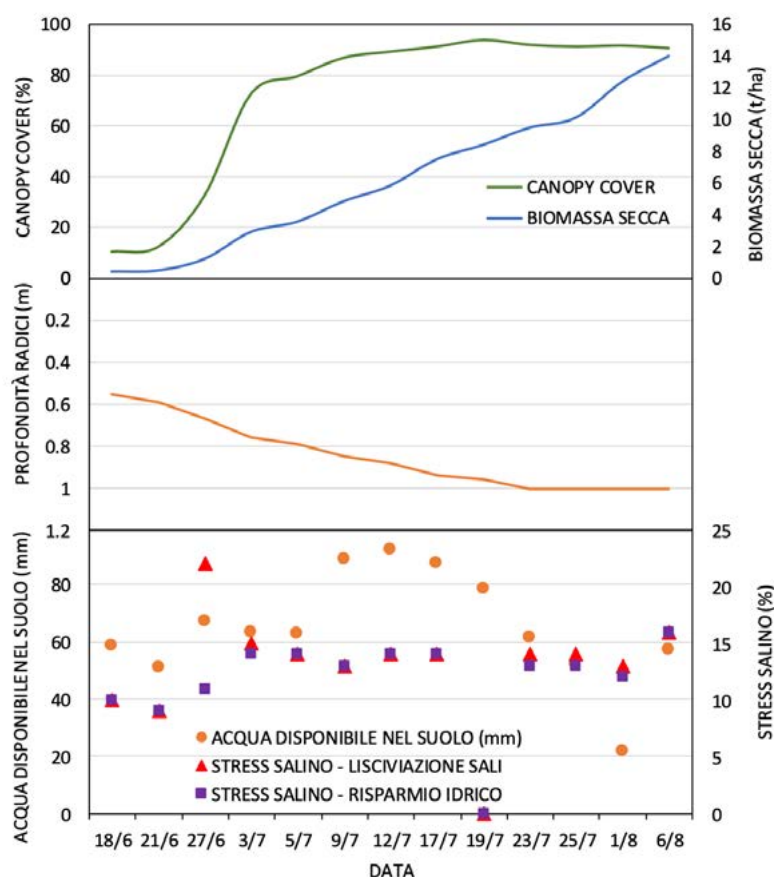
**Figura 4.4.4.** - Confronto tra il consiglio irriguo generato dal DSS Smart Agrowetlands secondo il criterio di lisciviazione dei sali (verde), il criterio di risparmio idrico (celeste) e il volume irriguo realmente applicato (arancione). In giallo sono riportate le precipitazioni e in arancione (linea continua) le temperature medie giornaliere. I consigli non eseguiti si distinguono da quelli effettivamente eseguiti per il loro colore più opaco, sono riportati alla data di emissione del consiglio. I valori sulla riga superiore dell'asse delle ascisse indicano le date in cui il DSS suggerisce di eseguire la irrigazione mentre sulla riga inferiore le date correnti in cui è emesso il consiglio irriguo.

**Figure 4.4.4.** - Comparison of the irrigation advice generated by the DSS Smart Agrowetlands according to the criterion of salt leaching (green), and the criterion of water saving (light blue) and the irrigation volume actually applied (orange). The precipitations are reported in yellow, and the average daily temperatures in orange (continuous line). The recommendations performed are distinguished from those not performed by the greater thickness and the brightest color. The values in the top row of the x axis indicate the dates on which the DSS suggests to perform the irrigation, while on the bottom row are the current dates; the DSS irrigation advice is drawn at the issue date.



In figura 4.4.5A e 5B sono mostrate le previsioni fornite dal DSS rispettivamente sullo sviluppo della canopy e della biomassa secca e sullo sviluppo e l'approfondimento delle radici. In figura 4.4.5C, invece, è mostrata la previsione dello stress salino percepito dalla pianta. Secondo il DSS, la pianta subisce un maggior grado di stress quando è applicato il criterio irriguo volto a generare lisciviazione dei sali piuttosto che quello conservativo teso a ridurre i consumi idrici. Questo plausibilmente perché con l'acqua di irrigazione sono immessi sali nel terreno e, quindi, probabilmente l'effetto negativo associato al maggior accumulo dei sali prevale sull'effetto positivo dovuto all'allontanamento di questi ultimi attraverso un'azione di lisciviazione. Ad ogni modo, il modello prevede che la coltura raggiungerà la ma-

turità fisiologica il 18 settembre ma che sarà pronta per la raccolta e la produzione di trinciato il 22 agosto, con una resa in biomassa secca non dissimile tra i due criteri, che si aggira intorno alle 19 t ha<sup>-1</sup>. La resa secca prevista dal DSS, tuttavia, risulta sovrastimata rispetto a quella realmente ottenuta, che si aggira intorno ai 11,4 t/ha. Il DSS, dunque, sovrastima il dato medio di produzione probabilmente perché non opera a livello areale e non tiene conto nel dettaglio dell'eterogeneità spaziale dei fattori che influiscono sulla produzione stessa. Per quanto riguarda, invece, la previsione sulla data di raccolta, il DSS ha previsto con esattezza che la pianta raggiungesse la maturazione cerosa il 22 agosto. La raccolta, infatti, è avvenuta il 24 agosto, solo due giorni dopo.



**Figura 4.4.5.** - Previsione prodotta dal DSS in termini di A) sviluppo della canopy cover e della biomassa secca della coltura, B) sviluppo e approfondimento dell'apparato radicale e C) contenuto idrico del suolo e andamento dello stress salino percepito dalla pianta nel caso di applicazione di una irrigazione volta ad ottenere lisciviazione dei sali o una irrigazione imposta sul criterio del risparmio idrico.

**Figure 4.4.5.** - Forecast produced by the DSS in terms of A) development of the crop canopy cover and dry biomass, B) development and deepening of the root system, and C) soil water content and salt stress trend perceived by the plant in the case of application of an irrigation aimed at obtaining salt leaching or irrigation set on the criterion of water saving.

#### 4.5. - The characteristics of satellites and sensors providing free images useful in agriculture are described.

### 4.5. - UTILIZZO DI IMMAGINI SATELLITARI IN AGRICOLTURA

Fra i satelliti ad elevata risoluzione che forniscono gratuitamente immagini idonee per l'impiego in agricoltura (land monitoring) i principali sono Sentinel 2, con risoluzione fino a 10 m, e Landsat 7 e 8, con risoluzione fino a 30 m.

Infine informazioni sullo stato dell'atmosfera utili per valutare l'effetto di imperfetta trasparenza sono fornite ancora gratuitamente dal satellite MODIS.

#### Landsat 7 e 8

Landsat è una famiglia di satelliti della NASA finalizzati alla analisi multidisciplinare della superficie terrestre, operativa fin dal 1972. Gli ultimi due, Landsat-7 (L7) e Landsat-8 (L8), hanno caratteristiche simili e sono ancora in orbita. L7, lanciato nel 1999 e vicino al termine del servizio, ha però un difetto nella camera di registrazione che determina nell'area di nostro interesse delle immagini incomplete, ragion per cui non è stato utilizzato benché le immagini termiche abbiano una miglior risoluzione di quelle di L8.

L8, lanciato nel 2013, offre una copertura della superficie terrestre con immagini ripetute ogni 16 giorni, sfasate di 8 giorni rispetto a L7. L'orbita è sincrona col sole e il satellite passa sempre intorno alle 10:00 UTC.

Il satellite monta due dispositivi di registrazione delle immagini; uno, Operational Land Imager, detto anche OLI, raccoglie immagini su 9 bande del visibile e dell'infrarosso vicino, cioè la radiazione riflessa, con risoluzione a terra di 30 o 60 m; l'altro, Thermal InfraRed Sensor detto TIRS, rileva 2 bande dell'infrarosso termico, cioè centrate sul campo di emissione della radiazione termica della terra. Le caratteristiche di acquisizione sono meglio precisate nella tabella seguente. I sensori coprono una striscia larga a terra 185 km.

#### Sentinel 2

Sentinel 2 è una costellazione di due satelliti ESA (European Space Agency), il primo di questi Sentinel 2A è stato lanciato il 23 giugno nel 2015, il secondo Sentinel 2B il 7 marzo 2017.

Copre la fascia di latitudini comprese fra 84°S e 84°N con periodicità di 20 gg, in questo periodo passa due volte sullo stesso punto, una volta su una traiettoria ascendente (da S a N) ed una seconda volta seguendo una traiettoria discendente. I due satelliti passano sfasati di mezzo periodo, sicché si hanno di un'area a terra, nuvole permettendo, 4 immagini ogni 20 giorni.

Sentinel-2 ospita un MultiSpectral Imager (MSI) che rileva la radiazione riflessa in 13 bande del visibile (VIS), dell'infrarosso vicino (NIR) e nell'infrarosso a onde corte (SWIR). Le caratteristiche sono presentate nella tabella seguente.

Le strisciate sono larghe 290 km, ma le immagini ortorettificate vengono fornite in tiles di dimensioni 100x100 km<sup>2</sup> a terra, nel sistema di coordinate UTM/WGS84. Fra un passaggio ed il più vicino c'è una significativa sovrapposizione fra le immagini, per cui in ogni punto dell'area coperta fornisce almeno una immagine ogni 5 giorni, ma nell'area di nostro interesse per effetto della sovrapposizione sono disponibili immagini ogni 2-3 giorni.

L8 Band		CW (μm)	Wavelength (lower-upper)	Bandwidth	Res. (m)		S2 Band		CW (μm)	Wavelength (min-max)	Bandwidth	Res. (m)
1	C/A	0.443	0.435 - 0.451	0.016	30	C/A	1	C/A	0.443	0.421 - 0.457	0.036	60
2	Blue	0.482	0.452 - 0.512	0.060	30	Blue	2	Blue	0.494	0.439 - 0.535	0.096	10
3	Green	0.561	0.533 - 0.590	0.057	30	Green	3	Green	0.560	0.537 - 0.582	0.045	10
4	Red	0.655	0.636 - 0.673	0.037	30	Red	4	Red	0.665	0.646 - 0.685	0.039	10
							5	VRE	0.704	0.694 - 0.714	0.020	20
							6	VRE	0.740	0.731 - 0.749	0.018	20
							7	VRE	0.781	0.768 - 0.796	0.028	20
							8	NIR	0.834	0.767 - 0.908	0.141	10
5	NIR	0.865	0.851 - 0.879	0.028	30	NIR	8a	NiR	0.864	0.848 - 0.881	0.033	20
							9	WV	0.944	0.931 - 0.958	0.027	60
9	Cirrus	1.373	1.363 - 1.384	0.020	30	Cirrus	10	Cirrus	1.375	1.338 - 1.414	0.076	60
6	SWIR	1.609	1.567 - 1.651	0.085	30	SWIR	11	SWIR	1.612	1.539 - 1.681	0.142	20
7	SWIR	2.201	2.107 - 2.294	0.187	30	SWIR	12	SWIR	2.194	2.072 - 2.312	0.240	20
8	Pan	0.590	0.503 - 0.676	0.172	15							
10	TIRS	10.895	10.60 - 11.19	0.590	100 *							
11	TIRS	12.005	11.50 - 12.51	1.010	100 *							

**Tabella 4.5.1.** - Bande di frequenza utilizzate dai satelliti L8 e S2, lunghezze d'onda in μm e risoluzione a terra in m

**Table 4.5.1.** - Frequency bands used by satellites L8 and S2, wavelengths in μm and ground resolution in m

## MODIS

Il Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, abitualmente indicato come MODIS, è uno strumento presente a bordo dei satelliti Terra (EOS AM) e Aqua (EOS PM) della NASA, lanciati rispettivamente nel 1999 e 2002, progettati per la osservazione della Terra, atmosfera ed oceani in particolare. Rileva 36

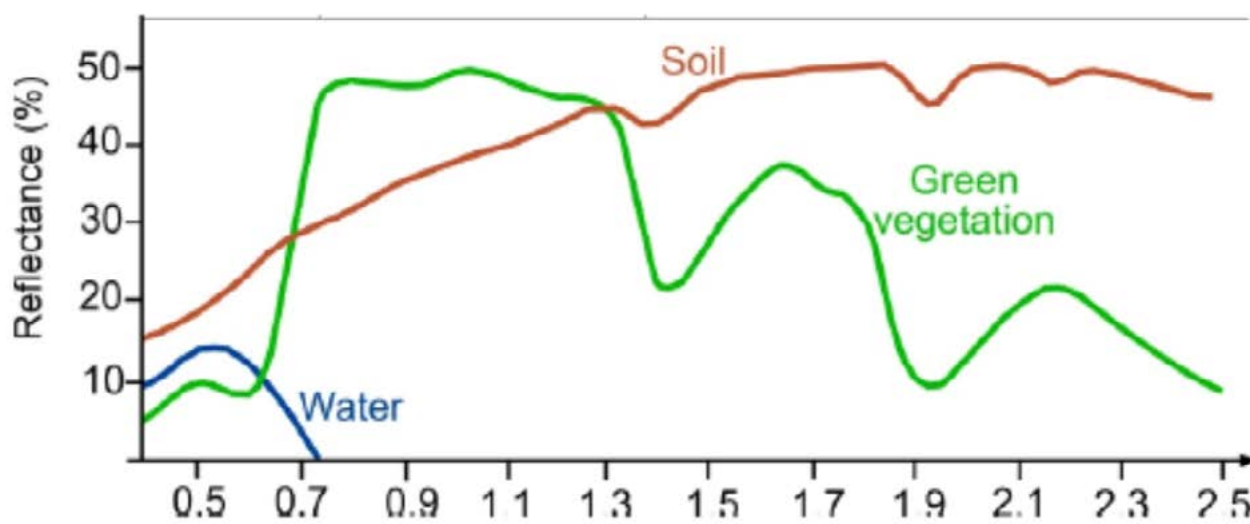
bande spettrali comprese fra 400 e 14.400 nm, con risoluzione di 250 m (2 bande), 500 m (5 bande) e 1000 m (29 bande). I suoi dati sono stati utilizzati per ricavare il contenuto di vapor acqueo nell'atmosfera, necessario per correggere la temperatura apparente della superficie terrestre per effetto della non perfetta trasparenza dell'atmosfera.

**4.6. -** The spectral signatures of the components of the agricultural landscape are described; indices relating to vegetation, water stress and salinity are then introduced and justified.

#### 4.6. - ELABORAZIONI E DEDUZIONI TRAMITE INDICI DEDICATI

La maggior parte degli indici utilizzati si basano sulla riflessione della luce solare nelle bande del visibile e

dell'infrarosso. Al variare della natura del suolo cambia lo spettro di riflettenza, cosicchè dalla firma spettrale (il variare della riflettenza alle varie bande) si può desumere la natura della superficie del suolo.



**Figura 4.6.1.** - Firma spettrale rappresentativa della vegetazione, del suolo e dei corpi idrici che compongono la quasi totalità del paesaggio agricolo.

**Figure 4.6.1.** - Spectral signature representative of the vegetation, soil and water bodies that make up almost all of the agricultural landscape.

L'acqua riflette praticamente solo nel visibile. La vegetazione verde, nel visibile assorbe soprattutto nelle bande del blue e del rosso per effetto della clorofilla, riflette moderatamente nella banda del verde, motivo per cui la vegetazione appare verde, mentre riflette molto nell'infrarosso vicino per effetto della struttura cellulare delle foglie. Il suolo o la vegetazione secca hanno una risposta meno variabile con la lunghezza d'onda ed in particolare non presentano discontinuità di riflettenza al passaggio fra visibile e infrarosso (red edge).

Esiste una molteplicità di indici categorizzati in relazione all'impiego:

- Vegetation Index: NDVI, SAVI, EVI e derivati
- Salinity index: SI, NIR, ...
- Water Stress: CWSI, NDMI, ...

Il rilievo della temperatura della superficie terrestre (Land Surface Temperature, LST) attraverso la misura della emissione nella banda dell'infrarosso termico (TIR) può essere usato in vario modo: o direttamente (CWSI), essendo elevate temperature indicatrici di stress idrico, o per valutare il bilancio energetico della superficie e da questo la evapotraspirazione (ET) effettiva, la cui stima può essere utilizzata come indicatore di crescita della pianta o, indirettamente se bassa, come indicatore di stress idrico.



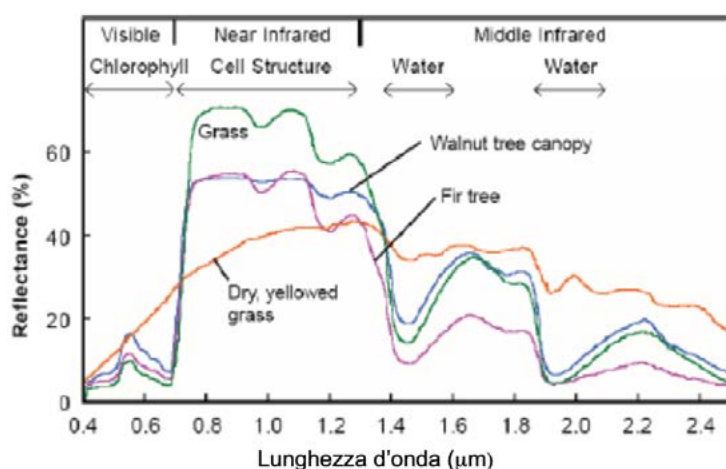
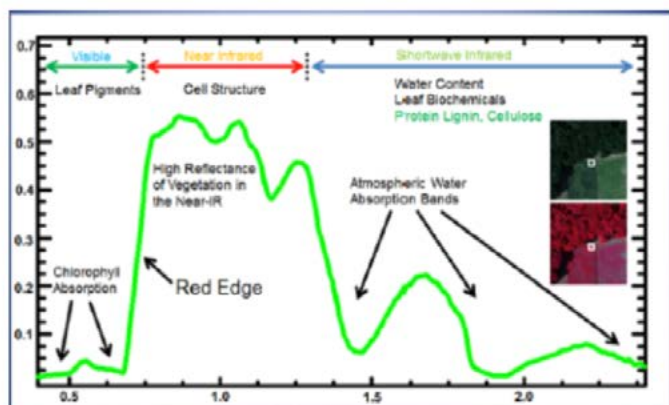


Figura 4.6.2. - In alto una illustrazione delle cause che rendono la firma spettrale della vegetazione così articolata. Sotto firme spettrali di diversi tipi di vegetazione. L'enorme differenza della risposta nel visibile e nell'infrarosso vicino è sfruttata in tutti gli indici di vegetazione. Dal confronto fra la firma dell'erba verde o secca emerge il razionale dell'indice NDMI (grass = erba, fir = abete, walnut = noce).

Figure 4.6.2. - Above an illustration of the causes that make the spectral signature of the vegetation so articulated. Under ghostly signatures of different types of vegetation. The enormous difference in the response in the visible and near infrared is exploited in all vegetation indices. The rationale of the NDMI index emerges from the comparison between the signature of green or dry grass.

## Indici di Vegetazione

L'indice di vegetazione più noto ed utilizzato è il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) che è stato introdotto da Kriegler et al. (1969) e poi utilizzato a seguito del lancio del primo Landsat (1973) ed è definito come segue

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS) = (R - 1) / (R + 1)$$

Ove con NIR e VIS si indicano le riflettenze (intrinsecamente positive) nelle bande corrispondenti, 400-700 e 700-1300 nm; esso è intrinsecamente compreso fra -1 e +1 e dipende dal solo rapporto  $R = NIR/VIS$  in modo monotono, di cui è quindi espressione.

Per la vegetazione la riflettenza nel visibile è bassa per la forte assorbenza della clorofilla, che per svolgere la funzione di sintesi deve assorbire fotoni di energia sufficiente, quale l'infrarosso non ha; per contro l'alta riflettenza nell'infrarosso è funzionale a non surriscaldare la pianta per effetto di radiazioni non efficaci per la sintesi di bio-

massa. L'assorbimento della clorofilla e dei carotenoidi è particolarmente attiva nelle bande del rosso e del blue, per cui la vegetazione appare verde. Oggi in luogo della banda VIS si utilizza la sola banda RED, con piccole differenze nei valori che comunque rimangono quando si utilizzano bande leggermente diverse come nei due satelliti Landsat e Sentinel.

NDVI è positivo per la vegetazione verde, per la quale al variare della riflettenza nel rosso dal 5 al 10%, e nell'infrarosso dal 50 al 70%, lo NDVI di una superficie totalmente coperta di vegetazione varia fra 0,67 e 0,87 circa. Lo NDVI rappresenta quindi in questo caso (copertura totale) una misura della efficienza della funzione clorofilliana, ovvero della vigoria della vegetazione.

Lo NDVI è positivo ma molto più basso (compreso fra 0,10 e 0,20) per vegetazione secca o suolo, per i quali rispetto alla vegetazione, la riflettenza nel visibile è assai più alta e più bassa nell'infrarosso. NDVI è negativo solo per

l'acqua; tanto più negativo quanto più è profonda e trasparente l'acqua o meno negativo se questa è torbida o traspare il fondo.

Osservando la superficie terrestre da satellite, con risoluzione non inferiore a 10 m, si osserva in campagna una mescolanza fra queste situazioni cosicché lo NDVI assume un valore intermedio fra quelli tipici della vegetazione e del suolo (o vegetazione secca) con buona approssimazione assimilabile alla media dei valori estremi pesata con la relativa copertura, donde lo NDVI può rappresentare, indirettamente, il grado di copertura del suolo da parte della vegetazione o il danneggiamento della coltura che ne porti ad una parziale essiccazione.

Sono state introdotte modificazioni all'indice NDVI tendenti generalmente a incrementare la risoluzione dell'indice attorno alle condizioni ottimali. Sono stati così introdotti gli indici EVI, Extended Vegetation Index, SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index ed altri assai simili, caratterizzati tutti dal fatto che l'indice si annulla quando NIR=RED e rimane positivo per suolo e vegetazione e negativo solo per l'acqua.

EVI, introdotto con la messa in orbita di MODIS, migliora la rappresentazione di vegetazione densa o con elevato Leaf Area Index (LAI) ed è così definito:

$$EVI = 2.5 * (NIR - RED) / (NIR + 6*RED - 7.5 *BLUE + 1)$$

E', come NDVI, 0 quando NIR=RED, quindi negativo per acqua e positivo per suoli coperti o meno da vegetazione.

Un indice che fornisce valori radicalmente diversi, anche se strettamente dipendenti dal solo valore del rapporto R, è il Wide Dynamic Range Vegetation Index (WDRVI) definito come

$$WDRVI = (NIR - 5*RED) / (NIR + 5*RED) = (R - 5) / (R + 5)$$

i cui valori sono sempre compresi fra -1 e +1, ma per il quale il limite superiore dell'acqua (NIR=RED) corrisponde al valore -2/3 ed il valore 0 corrisponde a R=5 e NDVI=2/3,

per cui il campo di valori propri dell'acqua è fortemente contratto, e quello proprio di una vegetazione vigorosa molto espanso; vengono così evidenziate le differenze di vigore della vegetazione al termine dello sviluppo vegetativo.

#### Indici di stress idrico

Nel progetto LIFE AGROWETLANDS II sono stati usati gli indici:

- Crop Water Stress Index (CWSI),
- Normalized Difference Moisture Index (NDMI).

CWSI è definito tramite la temperatura effettiva della coltura tenendo conto che più la coltura traspira più bassa è la sua temperatura. La temperatura effettiva ( $T_s$ ) in ogni punto viene confrontata con:

- la temperatura della coltura che, esposta alle stesse condizioni meteorologiche, avesse disponibile acqua a sufficienza per traspirare quanto possibile ( $T_{cold}$ ), cioè tanto che il vapore a contatto con le foglie diventa saturo,
  - la temperatura della coltura quando per carenza d'acqua non traspirasse per nulla ( $T_{hot}$ ),
- conducendo alla seguente definizione dell'indice:

$$CWSI = (T_s - T_{cold}) / (T_{hot} - T_{cold})$$

CWSI varia fra 0 e 1: vale 0 se viene traspirato quanto possibile ( $T_s = T_{cold}$ ) mentre vale 1 se non evapora nulla ( $T_s = T_{hot}$ ).

Quando l'indice viene stimato in base alle osservazioni satellitari, le temperature vengono identificate con quelle della superficie del suolo nel punto corrente e nei punti ove si realizzano le specifiche condizioni indicate, in genere il punto più freddo e il più caldo entro campi coltivati nell'area.

La temperatura della superficie del suolo può essere valutata dalla radiazione termica rilevata su L8 nelle bande 10 e 11, come indicato nel seguito per il bilancio energetico.

NDMI, introdotto da Gao (1996), si basa sulla diversa riflettanza nelle due bande NIR e SWIR (bande 5 e 6 di L8, 8 o 8a e 11 di S2) al variare del contenuto d'acqua nei

tessuti fogliari (vedi le linee verdi e arancio in figura 4.6.2). L'indice è così definito:

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

L'indice è intrinsecamente compreso fra -1 e 1, valori estremi che di fatto non raggiunge mai sulle colture; cresce comunque con il contenuto d'acqua nelle foglie, cosicché valori positivi denotano assenza o debole stress idrico e valori negativi presenza. Per il suolo nudo è intrinsecamente negativo (vedi figura 4.6.1), per cui quando la copertura è modesta l'indice può risultare negativo anche in assenza di stress idrico.

Dalla figura 4.6.2 potrebbe sembrare più idonea di SWIR la banda intorno a 1400 nm; per questa banda l'atmosfera è però totalmente offuscata dalla presenza di vapor acqueo, tanto che la si trova fra le bande acquisite da entrambi i satelliti perché rileva la sommità delle nubi anche solo velate, da cui il nome Cirrus, e viene usata per riconoscere le aree ove questa nuvolosità alta, che appare molto luminosa al satellite in questa banda, rende inaffidabile quantitativamente ciò che parrebbe di vedere a terra in altre bande.

#### Bilancio energetico, SEBAL ed evapotraspirazione

Utilizzando le bande termiche di L8 si può derivare la temperatura al suolo in vari modi, e dalla radiazione netta si può ottenere la evapotraspirazione utilizzando un complesso di formule fisicamente basate che per brevità non vengono qui trascritte; esse si basano comunque sul forte assorbimento di calore che è associato alla evaporazione dell'acqua.

Il modo più semplice per ottenere la temperatura al suolo consiste nel trascurare la imperfetta trasparenza dell'atmosfera, derivare la emissività della superficie terrestre combinando quella del suolo con quella della vegetazione tenuto conto della copertura vegetale desumibile dal NDVI, convertendo prima il digital number fornito per la banda 10 in radianza e poi questa in temperatura apparente (brightness temperature) tramite la legge di Planck di radiazione del corpo nero, e correggendo poi questa tem-

peratura per tener conto della reale emissività della superficie. La temperatura così ottenuta è mediamente 4 K sotto la temperatura vera a causa della imperfetta trasparenza dell'atmosfera. Per correggere questo errore si possono seguire due vie: 1) rappresentare il bilancio di radiazione dell'atmosfera, valutando in ragione del contenuto d'acqua della stessa la trasmittanza dell'atmosfera e le radiazioni da questa emessa verso lo spazio e verso terra o, 2) seguendo il metodo detto Split Window la temperatura apparente derivata dalla banda 10 viene corretta tenendo in conto sia del contenuto d'acqua dell'atmosfera che della emissività nelle due bande 10 e 11 tramite una formula empirica (Jimenez-Munoz et al., 2014).

Il controllo effettuato per confronto con il rilievo termico UAV ha mostrato che:

- i valori di temperatura desunti dal satellite alla risoluzione di acquisizione delle immagini termiche con la correzione degli effetti dell'atmosfera sono in ottimo accordo con quelli rilevati a bassa quota da UAV;
- la risoluzione di 30 m delle immagini termiche di L8 è illusoria;
- il pattern di distribuzione dello stress idrico non è significativamente influenzato dalla correzione dell'effetto atmosferico, che si traduce in un incremento quasi uniforme della temperatura sull'area rilevata.

La temperatura della superficie consente di valutare la radiazione netta emessa nella banda termica; la radiazione netta nella banda ottica si ottiene da quella incidente misurata alla stazione meteo e dalla albedo (riflettenza) media rilevabile dal satellite. Sommando i due termini si ottiene la radiazione netta sulla superficie. Di questa energia una parte penetra nel terreno e la restante parte viene trasmessa all'atmosfera in parte come calore sensibile ed in parte come calore latente di evaporazione. Questa ripartizione viene valutata secondo il metodo SEBAL tramite una relazione lineare fra la temperatura del suolo ed il salto termico sotto cui avviene lo scambio di calore sensibile, relazione lineare che viene determinata riconoscendo al suolo i due punti: uno caldo, ove non la evaporazione è nulla, e tutta la radiazione netta viene restituita all'atmo-

sfera sotto forma di calore sensibile, ed uno freddo in cui non c'è né salto termico fra foglie e aria né trasmissione di calore sensibile fra vegetazione ed atmosfera ma solo di calore latente di evapotraspirazione, che qui raggiunge la massima intensità o intensità potenziale compatibile con le condizioni ambientali.

Per traspirare meno del potenziale, la pianta chiude gli stomi e quindi limita oltre la traspirazione anche la anidride carbonica che deve assorbire dall'atmosfera per produrre biomassa attraverso la sintesi clorofilliana. La ridotta evaporazione comporta quindi anche una riduzione di crescita della pianta o stress idrico. L'evapotraspirazione comunque è un dato di interesse per l'agricoltore che, quando questa superasse la precipitazione, essicatosi in qualche misura il suolo, deve provvedere tramite irrigazione a conservare una umidità del suolo che consenta un adeguato sviluppo della coltura.

I valori di evaporazione giornaliera così desunti, quando il suolo è sufficientemente umido sono in accordo con quelli di evapotraspirazione potenziale stimati usualmente in base alle condizioni ambientali.

### Salinità

Per la mappatura della salinità del suolo sono stati proposti diversi indici la cui efficacia non è generale perché il suolo è per lo più coperto da vegetazione con specie di solito differenti da luogo a luogo, sicché l'effetto sulla immagine satellitare è diverso da contesto a contesto.

L'area da noi considerata è un'area agricola costiera non particolarmente arida, ci siamo pertanto riferiti ad uno screening di indici effettuato in Nguyen et al. Progress in Earth and Planetary Science (2020) 7:1 in per un'area planiziale nel delta del Mekong.

Sulla base delle analisi dei suoli svolte nel progetto su 49 campioni raccolti nell'ottobre 2016, al termine dell'estate in condizioni climatiche simili alla stagione secca in un clima monsonico, abbiamo verificato che anche nel nostro caso la banda che meglio di correla con la salinità è la banda NIR, per la quale abbiamo determinato la regressione

$$ECe = 5.7 * e^{-5.8 * NIR}$$

avente correlazione 0.52, non alta ma significativa.

Tramite questa correlazione sono state valutate le mappe presentate nel seguito.

Occorre osservare che la copertura vegetale ha un evidente effetto sulla salinità stimata, effetto che dovrà essere corretto. Cionostante il pattern che ne risulta è convincente. Le maggiori salinità si hanno ove i suoli derivano da sedimentazione in laguna e presumibilmente contengono ancora sali di formazione, zone che sono anche le più depresse e quindi soggette alla risalita dell'acqua salata in falda.



**4.7.** - Example images of the different indices are presented to point out the peculiarities of each single one. True color, vegetation indices, moisture indices are exemplified. Then a sequence of VI images represents vegetation development and the combination of vegetation cover and salinity index is used to represent time variation of salinity in the study area.

#### **4.7. - INFORMAZIONI UTILI ALLA AGRICOLTURA DESUNTE DALLE IMMAGINI SATELLITARI**

La figura sottostante riporta una immagine dell'area di studio cosiddetta in colori veri (true color), anche se si percepisce che i colori sono alterati in quanto la intensità

misurata in bande relativamente strette del Blue, del Verde e del Rosso vengono poi usate per presentare sullo schermo o su qualunque dispositivo lo spettro sovrapponendo bande di larghezza diversa da quella usata nel rilievo. Comunque si riconoscono bene il terreno nudo e le colture alla data ivi indicata.



**Figura 4.71.** - L'area di studio il 3 Luglio 2019 in 'true color' come rilevata dal satellite S2.

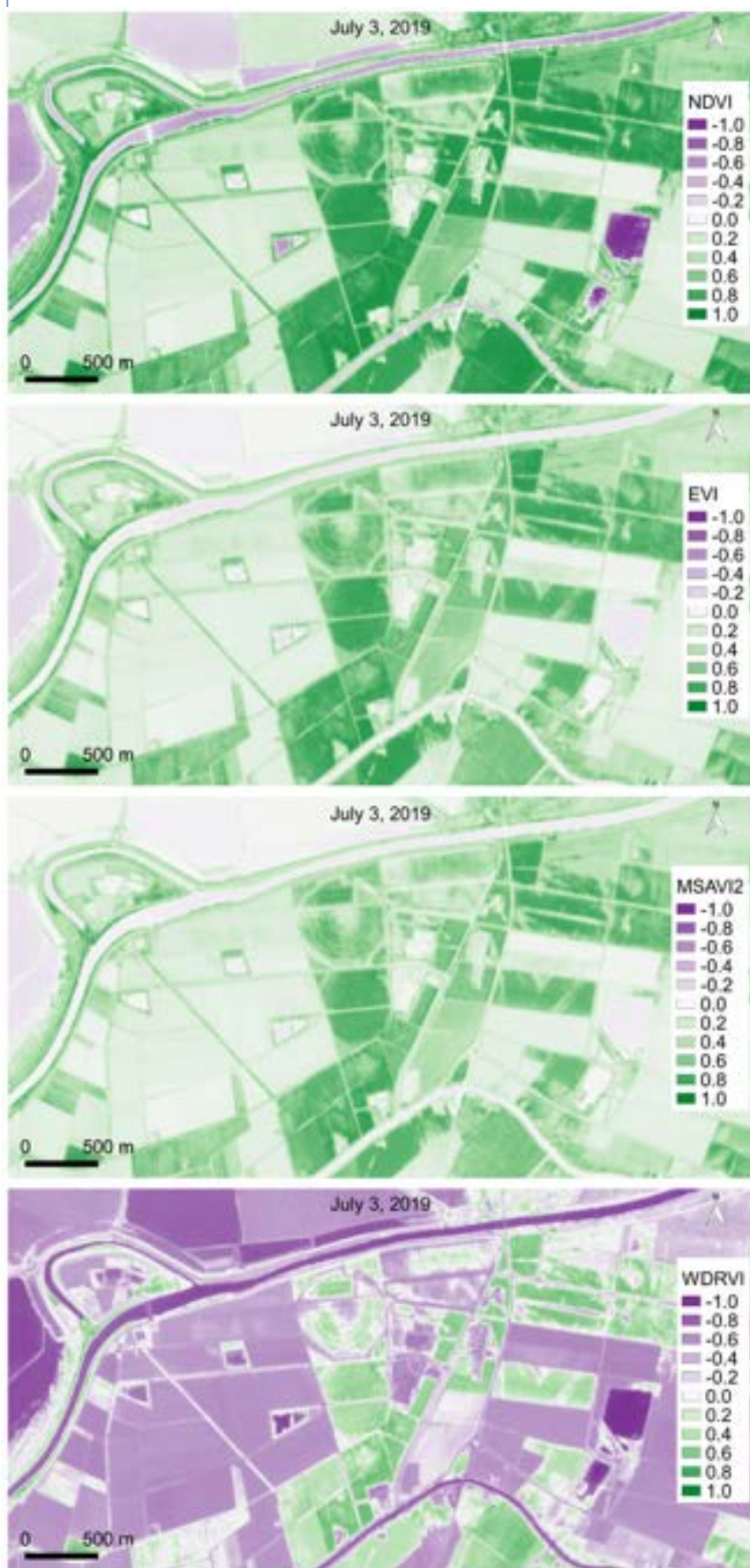
**Figure 4.71.** - The study area on 3 July 2019 in true color as detected by satellite S2.

La figura 4.71 presenta in questo caso nelle tre componenti cromatiche [R,G,B] del dispositivo utilizzato per presentare l'immagine le tre componenti corrispondenti, [4,3,2] di L8. Questa immagine è detta in "true color" perché la distorsione cromatica è modesta ma evidente: sono sovrarappresentati il verde e il rosso e sottoappresentati il blue e il giallo.

Per rappresentare le componenti non visibili, si possono trasferire al dispositivo le componenti rilevate dal

satellite in modo diverso, ad esempio per accentuare l'infrarosso possiamo presentare le bande [6,5,4] di L8 equivalenti a [B11, B8, B4] di S2. Queste comportano rappresentazioni in falso colore, molto diverse dalla nostra esperienza diretta e che quindi bisogna imparare ad interpretare.

Nel seguito facciamo uso di palette, cioè di un abbinamento colore valori che viene sempre presentato in figura per maggiore chiarezza.



**Figura 4.7.2.** - *Diverse rappresentazioni della vegetazione al suolo in data 3/7/2019. Si nota che per WDRVI è positiva solo la vegetazione ben sviluppata e si riconoscono più facilmente le zone di maggiore e minor vigore.*

**Figure 4.7.2.** - *Different representations of ground vegetation on 3/7/2019. It is noted that for WDRVI only well-developed vegetation is positive and the areas of greater and lesser vigor are more easily recognized.*

La figura 4.7.2 mostra per la stessa area e la stessa data gli indici vegetazionali precedentemente descritti. In tutti è rappresentata indirettamente la componente NIR non presentata in veri colori, ed in nessuna è presentata la componente verde che invece è molto evidente in veri colori. La palette è la stessa per tutte le immagini al fine di evidenziare la distorsione di valori corrispondente al cambiamento di indice.

Nelle mappe di NDVI risultano particolarmente evidenti i corpi idrici che appaiono come valori negativi rappresentati in violetto. Altrettanto evidente, soprattutto nel confronto con gli altri indici la tendenza di NDVI ad appiattire la rappresentazione dei valori alti, che appaiono invece ben articolati negli altri indicatori, soprattutto nell'ultimo WDRVI che è una semplice trasformazione algebrica del primo. In WDRVI il terreno nudo appare in violetto e potrebbe essere confuso con i corpi idrici, ma il vigore delle colture ben sviluppate appare con maggiore evidenza ed articolazione.

La figura 4.7.3 seguente rappresenta lo sviluppo del colture con il progresso della stagione estiva 2019 utilizzando l'indicatore più utilizzato NDVI. Si possono vedere alcuni campi in cui, essendo praticate colture invernali, la copertura verdeggianti decresce nel tempo durante la fase di maturazione; dopo il raccolto il terreno nudo appare bianco, dopodiché in alcuni campi il verdeggianti torna a crescere per effetto della vegetazione infestante.

In altri campi, ove sono state praticate colture estive seminate nella seconda metà di maggio, mais nel campo quadrangolare a sud del Reno e soia nel campo circolare, si segue meglio lo sviluppo. A giugno sono emerse dal terreno e a fine mese il mais ha iniziato la levata.

Le due immagini di Luglio del campo di mais rappresentano l'inizio e la fine della levata con il raggiungimento della piena copertura ove la coltura si è sviluppata meglio.

Le due immagini di Agosto rappresentano la fine della fioritura e il raggiungimento della maturazione cerosa. Durante questa fase dello sviluppo la coltura cambia un poco di colore, che da verde brillante inizia a virare verso il giallo, ciò comporta crescita della riflettanza nella banda del rosso e una riduzione di NDVI.

E' anche evidente la saturazione del verde che non consente di rappresentare la evoluzione della coltura attorno al picco dello sviluppo vegetativo.

Nella figura 4.7.4 è rappresentato lo stress idrico al 3 di Luglio e la corrispondente evaporazione. L'immagine il alto dello NDMI è desunta da bande di S2 a risoluzione 20 m.

Le immagini sottostanti del CWSI e della evapotraspirazione effettiva sono desunte invece dalle immagini della banda termica 10 di L8 acquisite con risoluzione 100 m e distribuite previa interpolazione con risoluzione 30 m.

Dal punto di vista grafico, il confronto con le precedenti immagini fa emergere la minor risoluzione delle immagini e ancor più le transizioni smussate indotte dalla interpolazione delle immagini termiche. Il giorno della immagine arriva al termine di un periodo assai caldo e siccitoso e subito prima delle irrigazioni praticate nella maggior parte delle colture estive.

Dal punto di vista dei contenuti tutte le immagini evidenziano la forte differenza fra colture invernali mature e suoli nudi aridi e caldi da cui evapora poco o nulla, e i campi di colture estive che traspirano ancora la umidità residua del suolo. Nel campo di mais si vedono gli effetti di una vena sabbiosa che, per la minor capacità di ritenzione idrica, si è seccata prima delle altre parti del campo e risulta più calda e meno traspirante.

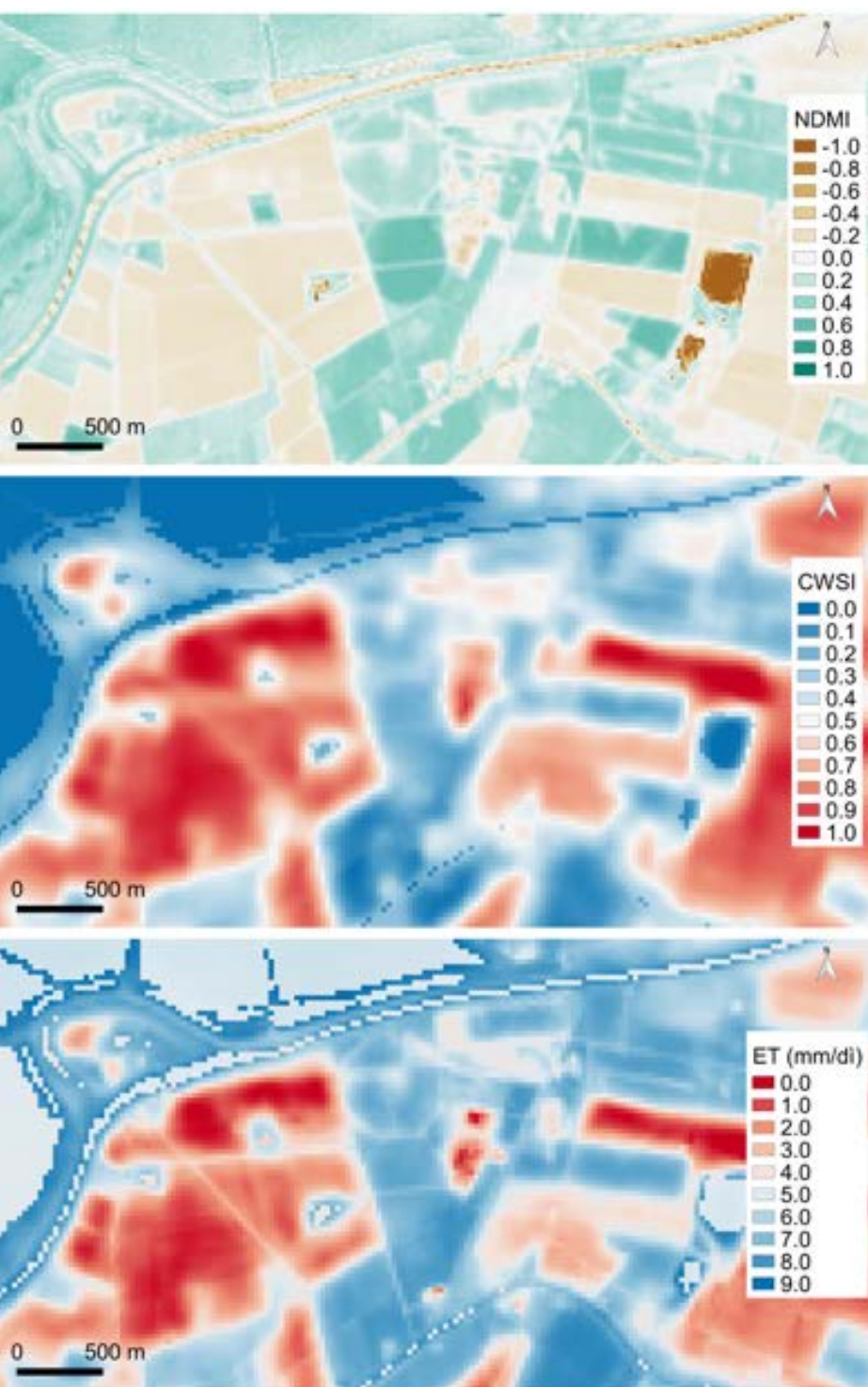




**Figura 4.7.3.** - Sviluppo delle colture nei mesi di Luglio e Agosto 2019 rappresentato attraverso l'indice NDVI, combinato di copertura e vigore della vegetazione.

**Figure 4.7.3.** - Crop development in July and August 2019 represented by the index NDVI, a combination of vegetation cover and vigor.





**Figura 4.7.4.** - Rappresentazione dello stress idrico e dell'evapotraspirazione a inizio Luglio. L'indicatore NDMI in alto è basato sulla risposta all'infrarosso vicino e medio desunta da un'immagine S2 (risoluzione 20 m). Le sottostanti immagini rappresentano lo CWSI e l'evapotraspirazione desunte da immagini L8 dell'infrarosso termico; la risoluzione è formalmente di 30 m ma le immagini termiche all'origine hanno risoluzione 100m. Lo NDMI rappresenta la presenza di acqua nel fogliame; se non c'è vegetazione i suoi valori non sono indicatori di umidità: ad es. è molto basso nei corpi d'acqua.

**Figure 4.7.4.** - Representation of water stress and evapotranspiration in early July. The NDMI indicator at the top is based on the near and medium infrared response inferred from an S2 image (resolution 20 m). The images below represent the CWSI and evapotranspiration taken from L8 images of the thermal infrared; the resolution is formally 30 m but the thermal images at the origin have a resolution of 100m. NDMI represents water content in the canopy, where the vegetation is not present its values do not represent moisture: for instance it is very low in water bodies.

Infine per quanto riguarda la salinità dei suoli presentiamo una successione di immagini a diverse date da inizio a fine progetto ove si riconoscono suoli nudi e superfici vegetate tramite la mappa di NDVI

e la mappa di salinità non corretta per l'effetto della vegetazione. E' evidente che appaiono più saline le aree nude che non quelle coperte di vegetazione.

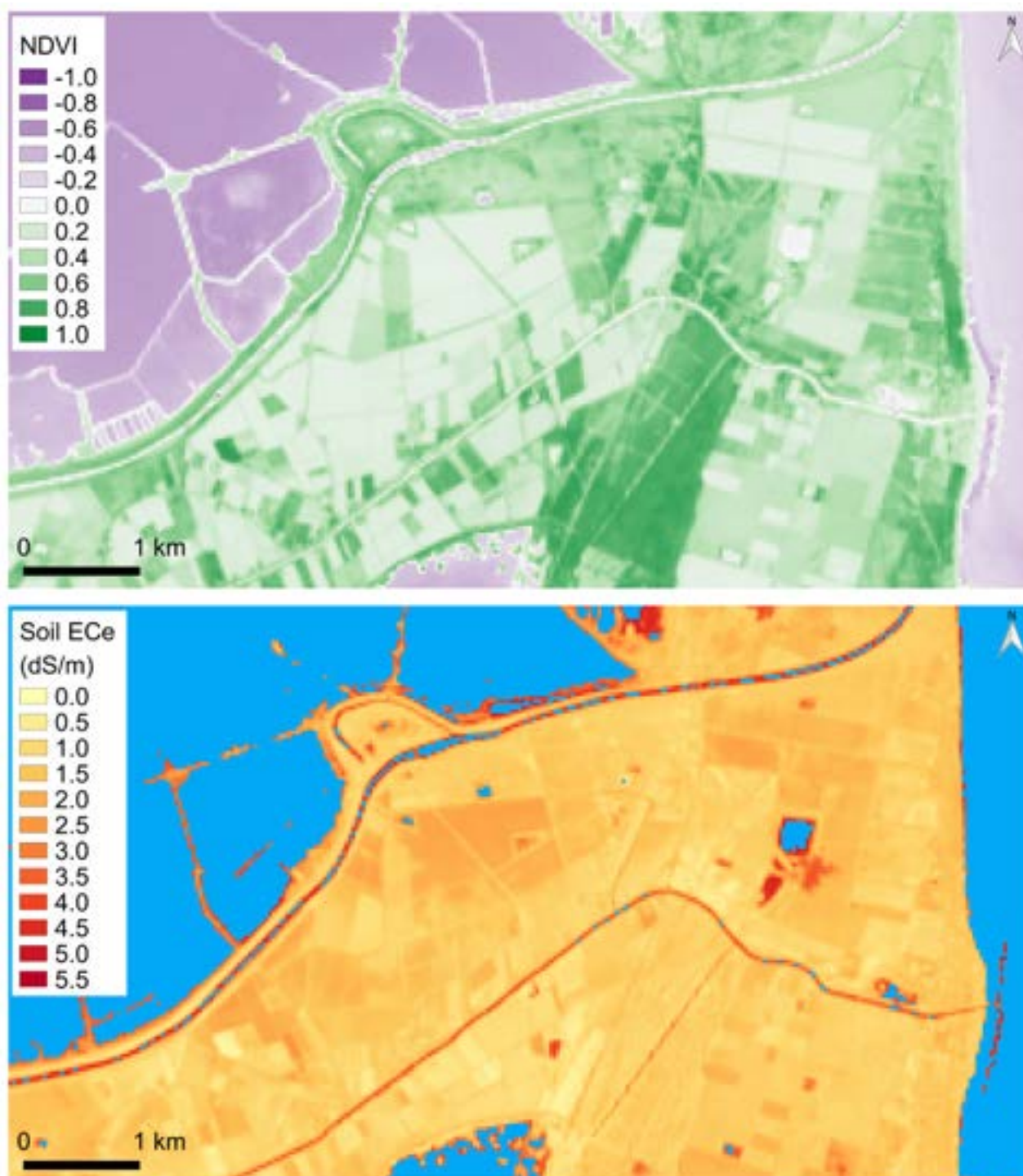
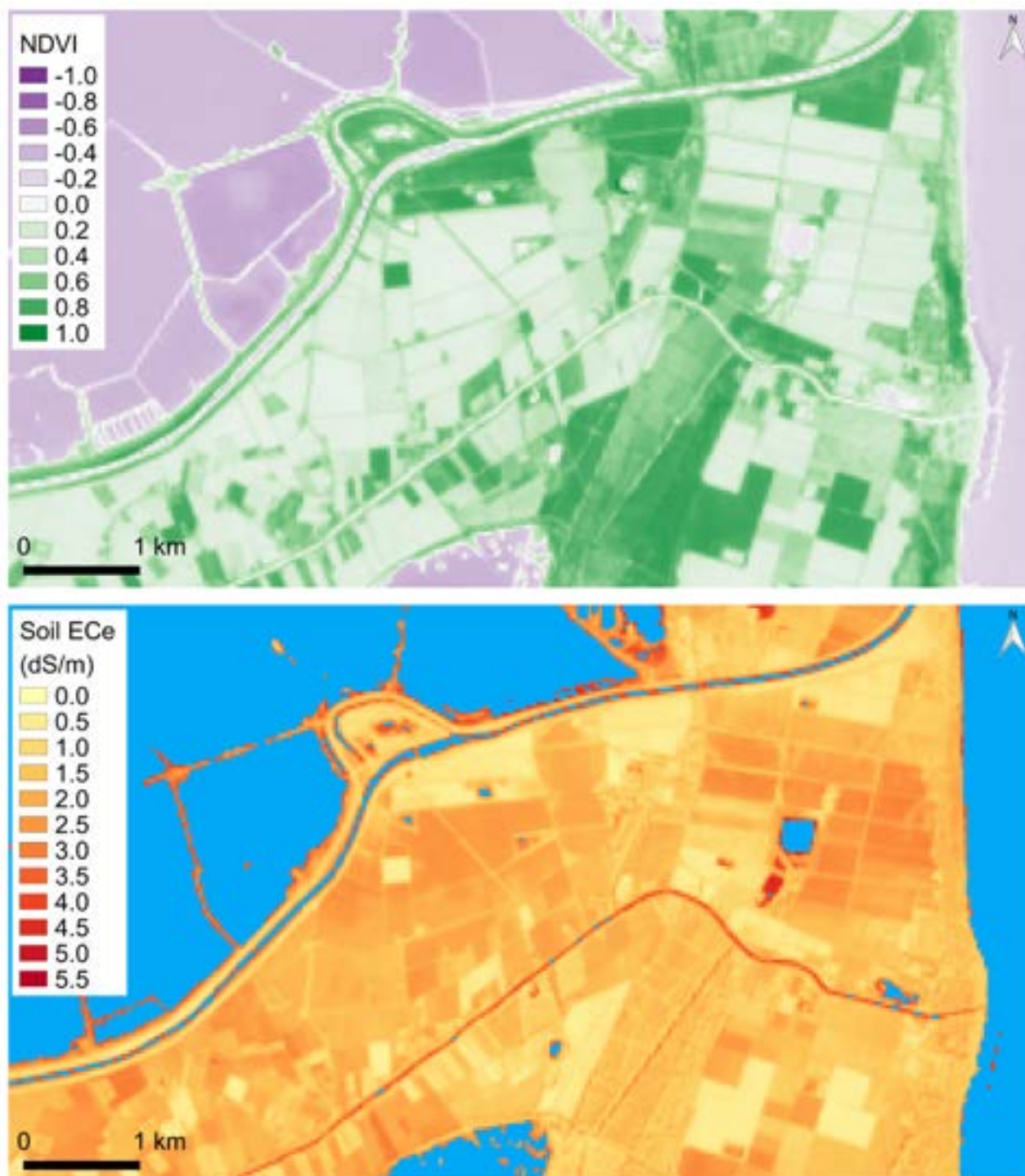


Figura 4.7.5. - La situazione a inizio progetto il 12 settembre 2016.

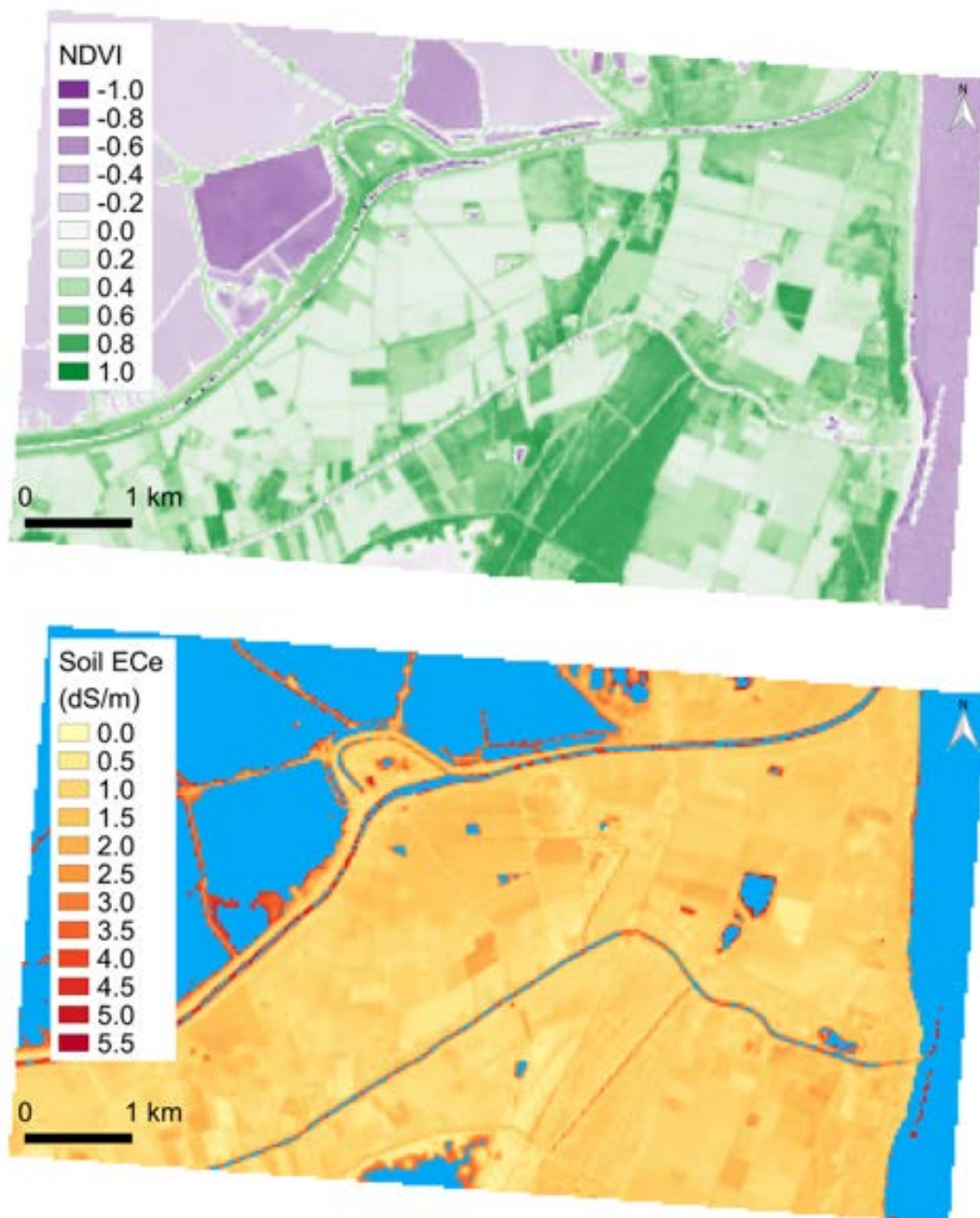
Figure 4.7.5. - The situation at the start of the project on 12 September 2016.





**Figura 4.7.6.** - La situazione al termine della siccità autunnale del primo anno al 30 ottobre 2016. Rappresenta la situazione di maggior salinità diffusa durante il periodo del progetto.

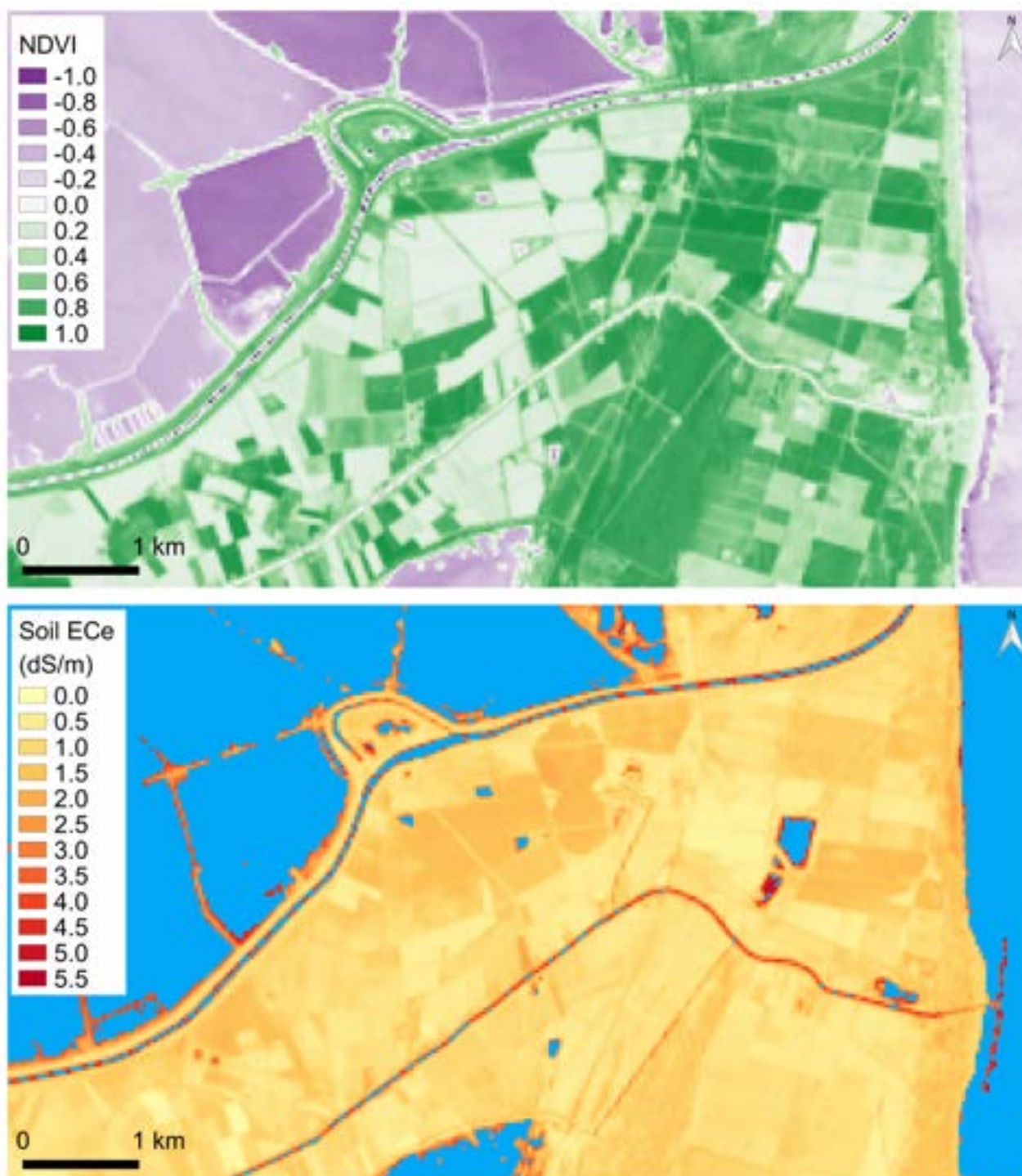
**Figure 4.7.6.** - The situation at the end of the autumn drought of the first year on 30 October 2016. It represents the situation of greater salinity widespread during the project period.



**Figura 4.7.7.** - La situazione tre anni dopo l'inizio del progetto il 14 set 2019. La salinità parrebbe essere diminuita, anche in aree su cui Agrowetlands non ha operato.

**Figure 4.7.7.** - The situation three years after the start of the project on 14 September 2019. The salinity appears to have decreased, even in areas where Agrowetlands has not operated.





**Figura 4.7.8.** - La situazione al 2 maggio 2020. In questa immagine è particolarmente evidente l'effetto della vegetazione, che a tarda primavera si è sviluppata più o meno vigorosamente eccetto che nei campi predisposti per la semina di colture estive.

**Figure 4.7.8.** - The situation as of May 2, 2020. In this image, the effect of the vegetation is particularly evident, which developed more or less vigorously in late spring except in fields set up for sowing summer crops.



Figura 4.7.9. - La situazione al 11 maggio 2020. Anche qui appare evidente l'effetto della vegetazione.  
 Figure 4.7.9. - The situation as of 11 May 2020. Here too the effect of vegetation is evident.

La salinità varia nel tempo in relazione alla vicenda climatica annuale, a precipitazioni e irrigazioni, alle colture praticate, alle lavorazioni del terreno, per cui nel volgere di pochi anni avendo inciso in misura marginale su tutte queste vicende è impossibile riconoscere alcun effetto sistematico certo. Abbiamo documentato i processi in atto, ed in questo le immagini satellitari sono un ottimo strumento per descrivere i processi distribuiti sul territorio, la cui lettura richiede però l'apprendimento di nuovi linguaggi che sono stati ben formalizzati solo in parte.

### Conclusioni

Le immagini satellitari sono in grado di fornire ottime indicazioni di ciò che si manifesta sulla superficie del suolo, come:

- lo sviluppo in orizzontale delle colture (copertura vegetale) ben correlata allo NDVI,
- crescita massiva ed in altezza della coltura meglio rappresentata dal Leaf Area Index, rapporto fra superficie fogliare e impronta a terra, ben correlato al EVI, la vigoria della vegetazione a piena copertura dal WDRVI
- la temperatura della superficie LST e la evapotraspirazione ETa, strettamente correlate; la prima è direttamente misurata attraverso la banda termica, la seconda è derivabile dalla temperatura attraverso procedure che possono apparire complesse, ma che messe a punto sono di facile gestione,

- la carenza idrica nei tessuti fogliari che precede la sofferenza grave della coltura, derivabile in modo semplice dal variare della firma spettrale della vegetazione attraverso l'indice NDMI.

Tutto questo può essere valutato rapidamente, in tempo reale nel senso che la elaborazione delle immagini di un passaggio del satellite, può essere conclusa prima del successivo passaggio dello stesso o di un altro satellite, su aree anche molto estese (il tile S2 ha dimensioni 100 x 100 km<sup>2</sup>) da una o due persone dotate di PC, più altrettanto per curare la diffusione capillare di questa informazione.

E' una attività che può essere svolta con la massima efficienza da un ente che abbia competenza su aree non minori del tile, come sono i consorzi di bonifica, o uffici regionali e provinciali.

Qualche ulteriore miglioramento degli strumenti deve essere fatto per adattare alcune relazioni empiriche alle singole colture, senza che questo alteri sostanzialmente l'efficacia dello strumento.



**4.8. -** Methods followed to perform the UAV survey and obtain good resolution and precise positioning for both color and thermal images are described. The use of these images is then presented and temperature desumed from Landsat satellite surveys are positively checked. It is also shown how useful information for agriculture can be obtained, that needs an image resolution of a few centimeters and therefore cannot be obtained from satellite images.

## 4.8. - UTILIZZO DI IMMAGINI DA DRONE AD ELEVATA RISOLUZIONE

### 4.8.1 - Metodologia e caratteristiche geometriche del rilievo

Per approfondire le caratteristiche di alcuni appezzamenti oggetto di studio, all'interno dell'area di progetto LIFE AGROWETLANDS II, si è proceduto con l'individuazione di una significativa porzione di territorio per effettuare un rilievo mediante SAPR (Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto), comunemente chiamato drone. La superficie

complessiva di terreno oggetto di rilievo, coerentemente con le esigenze di analisi e le capacità di rilievo del drone è stata valutata complessivamente pari a 5 ettari.

Le operazioni di volo mediante SAPR si sono svolte in conformità alla normativa del settore ENAC e rispettando i limiti del volo imposti a questa tipologia di aeromobili. In questo contesto è stata anticipatamente studiata la limitazione al volo che insiste in una porzione dell'area di studio, per la presenza di area militare sulla quale le operazioni di rilievo SAPR risultano interdette (Figura 4.8.1).



**Figura 4.8.1. -** Area interdetta al volo evidenziata con campitura di colore rosso.

**Figure 4.8.1. -** No-fly zone highlighted with red background.

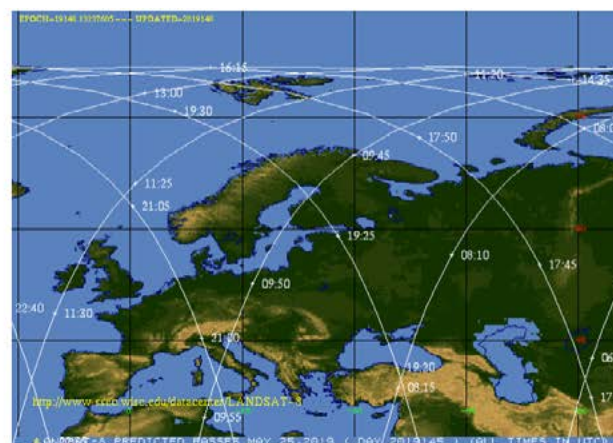
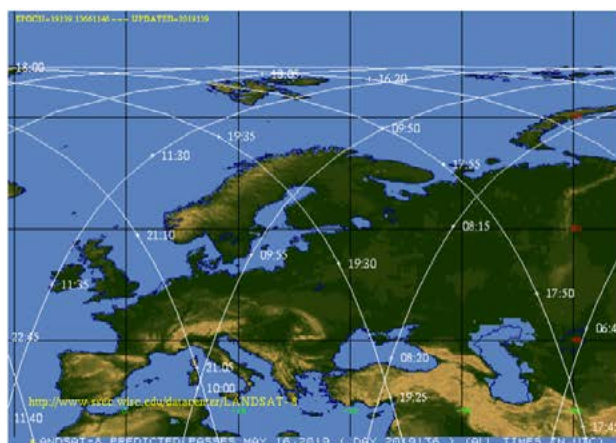


Il SAPR individuato per l'esecuzione delle attività di rilievo è composto da un quadricottero ad ala rotante con decollo verticale, con autonomia di volo sufficiente ad effettuare sessioni ininterrotte di 30 minuti tra fase di decollo e fase di atterraggio. Il drone è inoltre dotato di sistema di posizionamento GPS installato a bordo oltre ai sensori utilizzati per l'acquisizione di immagini. La stazione di terra (Ground Station: GS) è composta da un radiocomando in grado di comunicare con il drone mediante onde radio con portata del radiocomando sufficiente a consentire la corretta esecuzione delle missioni di volo. La GS è ulteriormente provvista di sistema di controllo del drone tramite software di pianificazione di volo in grado di fare eseguire in modo automatico un percorso stabilito a priori e ripetuto in uguale modo per ogni sessione di rilievo.

Le attività di rilievo sono state progettate per essere eseguite con una combinazione di due sensori: ottico (RGB) e sensore all'infrarosso termico. La camera termica radiometrica è del tipo "Uncooled VOx Microbolometer" ad alta sensibilità (NEΔT) <50 mK a f/1.0, con risoluzione pari a 640x512 pixel, acquisizione in banda spettrale compresa tra 7.5 μm e 13.5 μm, pixel pitch 17 μm, con elevata velocità di acquisizione pari a 30 Hz.

La pianificazione delle operazioni di volo è stata accuratamente eseguita per ottenere un rilievo composto da un insieme di immagini acquisite secondo strisciate fotogrammetriche adiacenti in modo da comporre un blocco fotogrammetrico. Di conseguenza in fase di progettazione del volo è richiesta una sovrapposizione tra i fotogrammi che compongono una singola striscia superiore al 60% e trasversale tra le striscie adiacenti non inferiore all'80% dell'area di copertura di tali immagini. Le immagini vengono acquisite con camera in assetto nadirale montata su gimbal a compensazione della variazione di assetto e delle vibrazioni del drone.

Il rilievo in oggetto è stato ripetuto in 10 differenti sorvoli nel periodo tra il 16 maggio 2019 ed il 4 settembre 2019 compresi. Il rilievo stesso è inoltre stato progettato per essere svolto in una opportuna fascia oraria con condizioni meteorologiche ottimali, assenza di pioggia e copertura nuvolosa, in orario compreso tra le ore 11:00 e le ore 13:00. Le date per eseguire il rilievo, compatibilmente con le restrizioni menzionate, sono state scelte cercando la coincidenza con il passaggio del satellite LANDSAT-8 nell'area di oggetto di indagine, per poter confrontare i dati termici acquisiti dalle due piattaforme, seppur con risoluzioni a terra differenti.



**Figura 4.8.2.** - Grafico che illustra il passaggio programmato del satellite LANDSAT-8 (orario UTC).

**Figure 4.8.2.** - Graph showing the planned passage of the LANDSAT-8 satellite (UTC time).

Scegliendo un'opportuna piattaforma per il rilievo SAPR, è stato possibile eseguire contemporaneamente l'acquisizione con entrambi i sensori, ottico e termico, grazie al sistema doppia gimbal presente a

bordo del drone DJI Matrice 210. La camera termica, in particolare, per rispondere ai requisiti progettuali, è stata specificatamente scelta come DJI Zenmuse XT (Figura 4.8.3).



**Figura 4.8.3.** - Allestimento del drone DJI Matrice 210 per le operazioni di volo con il sistema a doppia camera.

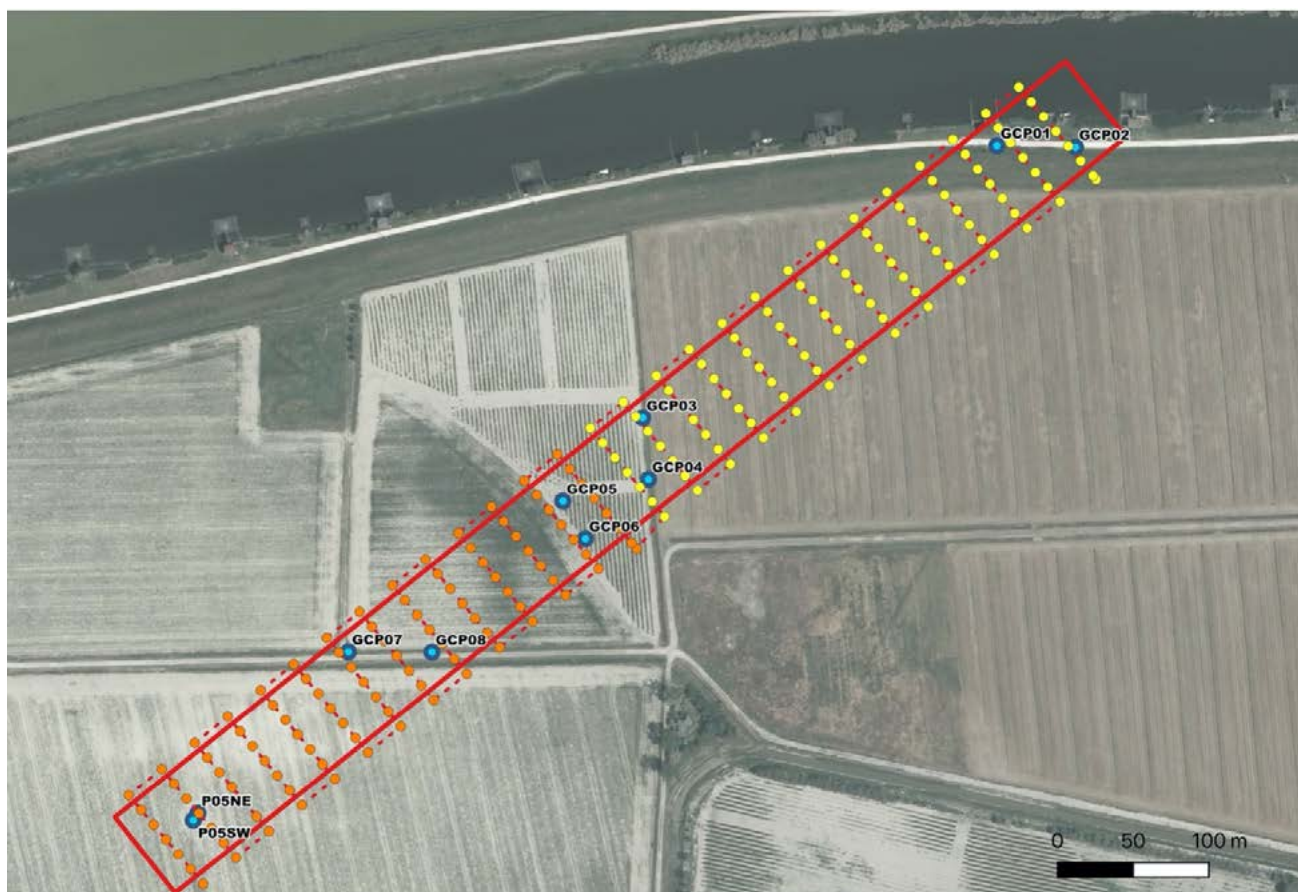
**Figure 4.8.3.** - Setting up the DJI Matrice 210 drone for flight operations with the twin camera system.

In conformità con i suddetti requisiti, è stata individuata l'area da rilevare con dimensione complessiva di 800 m x 64 m quindi pari a 5.12 ettari (Figura 4.8.4). La geometria ipotizzata è descrivibile come un transetto di lunghezza sufficiente a coprire due diversi appezzamenti coltivati. La dimensione massima è stata imposta inferiore a 1000 metri, per consentire il pilotaggio del SAPR da posizione baricentrica all'area, rispettando sempre la distanza massima di 500 metri tra l'operatore a terra ed il drone.

Per garantire la più elevata omogeneità di condizioni di illuminazione e temperatura sui dati acquisiti, è stato studiato un piano di volo perpendicolare alla

massima lunghezza del poligono individuato, per ottenere fotogrammi adiacenti acquisiti in istanti di tempo ravvicinati.

Ulteriore attività di pianificazione ha riguardato lo studio e la materializzazione a terra tramite picchetti in legno di circa 30 cm infissi per metà nel terreno di target (Ground Control Points: GCP) che potessero ritenersi stabili per l'intera durata delle attività di rilievo. La distribuzione spaziale e la quantità di tali GCP è stata studiata per vincolare correttamente la geometria del rilievo e consentire una corretta georeferenziazione delle immagini acquisite durante l'elaborazione fotogrammetrica (Figura 4.8.4).



**Figura 4.8.4.** - L'area oggetto del rilievo (poligono rosso), il piano di volo (linea tratteggiata), i punti di scatto delle immagini termiche (punti giallo-arancio), i GCP (punti azzurro).

**Figure 4.8.4.** - The area covered by the survey (red polygon), the flight plan (dotted line), the snap points of the thermal images (yellow-orange points), the GCPs (blue points).

Sono stati appositamente realizzati dei target rimovibili di dimensioni 30x30 cm, predisposti per essere vincolati e centrati in posizione sul picchetto in legno. I target sono stati rivestiti con alluminio per renderli chiaramente visibili sia nelle immagini ottiche che nelle immagini termiche. Ogni GCP è stato rilevato mediante strumentazione GNSS NRTK con precisione nel posizionamento assoluto non inferiore a 0.05 metri (Figura 4.8.5).



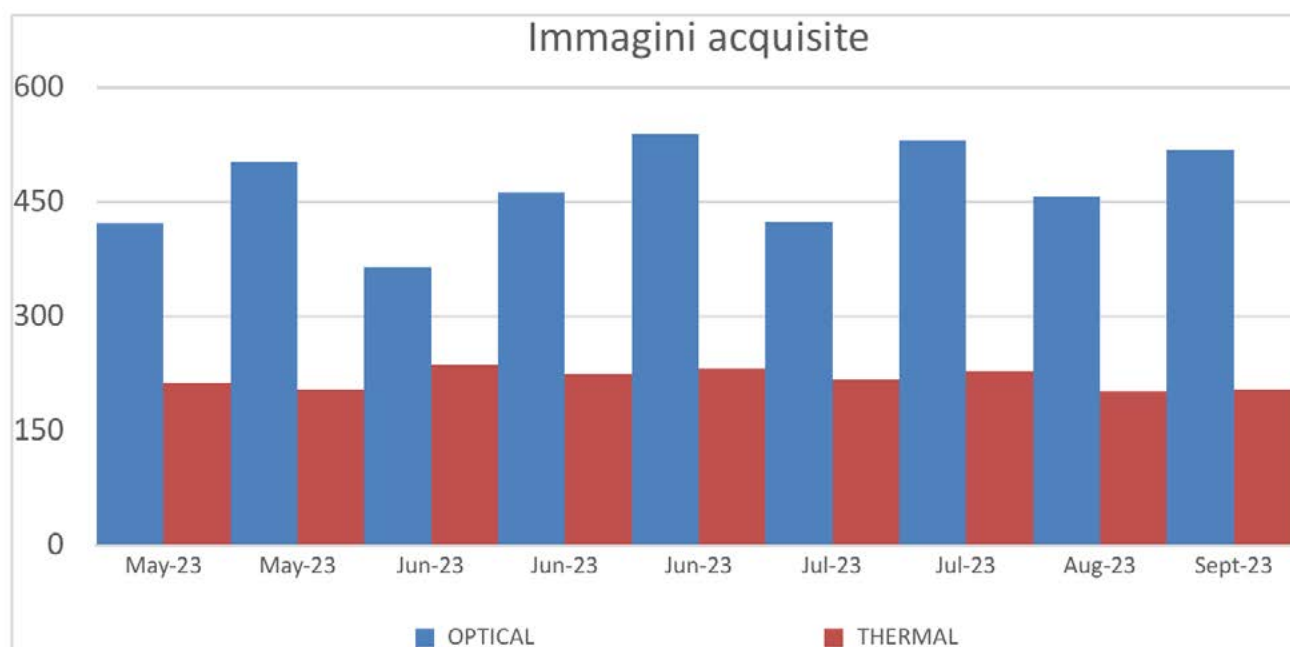
**Figura 4.8.5.** - Rilievo mediante strumentazione GNSS RTK di Ground Control Point

**Figure 4.8.5.** - Ground Control Point survey using GNSS RTK instrumentation



Complessivamente sono stati eseguiti 10 sorvoli nel periodo indicato, dei quali 9 con sensore ottico e termico (Figura 4.8.6) ed un ulteriore sorvolo con sensore multispettrale, utile per ricavare informazioni

sullo stato vegetazionale tramite indici come NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).



**Figura 4.8.6.** - Distribuzione quantitativa e temporale delle immagini acquisite.

**Figure 4.8.6.** - Quantitative and temporal distribution of the acquired images.

Le immagini termiche radiometriche sono acquisite in formato "radiometric JPG" - RJPG (8 bit) contenente in ogni pixel informazioni sulla temperatura assoluta registrata dal sensore.

Inoltre, in data 26 giugno 2019, è stato possibile eseguire un ulteriore rilievo, secondo la medesima pianificazione di volo, ricoprendo l'area progettuale di 5 ettari, mediante sensore multispettrale Parrot Sequoia, acquisendo ulteriori 3846 immagini TIFF (16 bit), divise nelle 4 bande del sensore alle seguenti lunghezze d'onda: Green (550 nm), Red (660 nm), Red Edge (735 nm), Near infrared (790 nm).

Contestualmente alle attività di rilievo SAPR, sono stati acquisiti dati di temperatura a terra utilizzando un logger collegato ad una termocoppia che registra dati ogni 5 minuti durante l'intero periodo delle operazioni. La termocoppia è posizionata a contatto con un target di materiale plastico colore bianco di dimensioni indicative pari a 1x2 metri, facilmente vi-

sibile dalle immagini termiche.

Le immagini acquisite sono state infine elaborate mediante tecniche fotogrammetriche e Structure from Motion (SfM) per realizzare ortofotomosaici ad elevata risoluzione dell'area rilevata. I prodotti finali, realizzati mediante l'utilizzo dei GCP precedentemente rilevati, risultano quindi coerentemente georeferenziati nel sistema di riferimento di progetto con datum European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) e proiezione nel fuso 33 Nord (EPSG:3045).

In particolare, le immagini termiche radiometriche vengono pre-processate con specifico software FLIR, corrispondente al produttore dell'hardware, tenendo conto dei parametri ambientali (temperatura e umidità aria) e verificate tramite la temperatura a terra misurata dalla termocoppia sull'apposito target di riferimento. Il risultato del pre-processamento del dato termico consiste in una sequenza di



immagini raster in formato TIFF sprovviste di dati EXIF (coordinate GPS della posizione di acquisizione). Mediante software EXIFTOOL le coordinate di ogni immagine originariamente acquisita vengono esportate su file di testo CSV, associando le stesse coordinate all'identificativo del file immagine e registrando nello stesso file la precisa quota di volo. Le immagini così preparate vengono elaborate con procedimento fotogrammetrico sulla base delle coordinate dei centri di presa (derivate dall'EXIF, con una precisione di 10 metri, data dal GPS di bordo di sola navigazione) e vincolate alle coordinate dei GCP (misurate con GNSS topografico, con una precisione di 0.02 metri).

Le immagini vengono preliminarmente allineate generando una nuvola di punti sparsa. Sono manualmente rimossi eventuali outliers. Vengono collimati i centri di tutti i target con coordinate note (GCP) in ogni fotogramma in cui essi risultano visibili. Sono di conseguenza verificati gli errori e le tolleranze di misura. Conseguentemente viene realizzato una ottimizzazione del posizionamento delle camere ed i relativi parametri e prodotta una nuvola di punti densa del modello finale. Sulla nuvola di punti viene realizzata una mesh che servirà come base alla successiva produzione di ortofoto (ottica o termica nei rispettivi casi).

Nella fase di produzione di ortofoto da immagini ottiche, è opportuno prevedere una procedura di blending per rendere più uniforme e interpretabile la mappa finale, minimizzando eventuali effetti di differente illuminazione o esposizione che possono essere presenti in fotogrammi adiacenti.

In via cautelativa, la procedura di blending non è invece applicata alle immagini termiche per evitare di modificare in modo artificioso il valore di temperatura registrato nei fotogrammi originali. Di conseguenza è possibile osservare dei "salti" radiometrici nei pixel tra diverse strisciate adiacenti, dovuti a problemi di deriva tipici dei sensori termici.

Il dato termico è esportato in formato raster con dimensione del pixel a terra pari a 0.05 m. Il dato ottico è esportato in formato raster con dimensione

del pixel a terra pari a 0.02 m. La precisione finale dei prodotti, considerate le specifiche condizioni del terreno acquisito ed i parametri del rilievo, si attestano a 0.10 – 0.15 m sulla componente geometrica

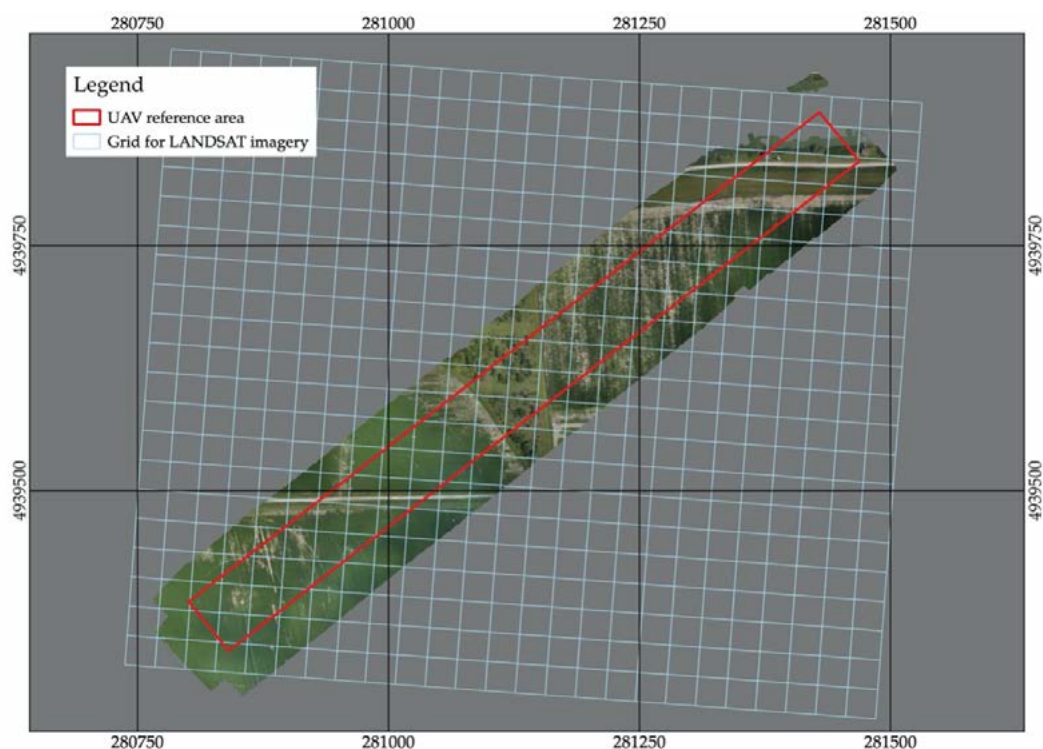
#### 4.8.2. Risultati ottenuti

La motivazione primaria della indagine era "convalidare i valori di temperatura rilevati da satellite", considerata la loro importanza sia nella valutazione dello stress idrico e della evapotraspirazione effettiva, che per il regolare sviluppo della coltura.

La convalida ha posto problemi associati a diversi aspetti del rilievo.

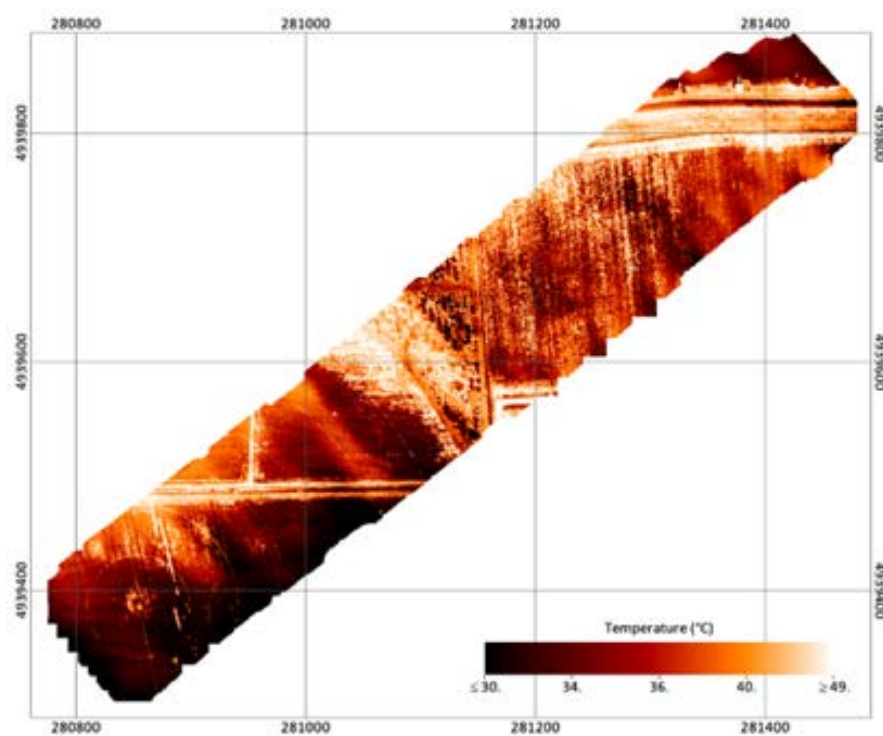
- 1) La enorme differenza di risoluzione fra le due tipologie di rilievo: non più di 5 cm per il rilievo da drone e non meno di 10 m per i rilievi satellitari disponibili facilmente.
- 2) La temperatura misurata tramite la radiazione richiede la conoscenza della emissività della superficie nella banda termica.
- 3) La corretta valutazione del bilancio energetico e della evapotraspirazione richiede di valutare gli effetti dell'atmosfera sul passaggio della radiazione attraverso di essa; con cielo sereno questo è principalmente un piccolo ma non trascurabile assorbimento.

In relazione al primo punto il confronto è possibile solo alla scala dei pixel satellitari, aggregando a questa scala i valori misurati da drone; fortunatamente la proiezione a terra del grigliato satellitare è disponibile, i cui elementi nel seguito sono indicati come tile (piastrella), vedi figura 4.8.7. Ovviamente il drone è in grado di rilevare fenomeni di piccola scala che il satellite comunque non può rilevare, misurando solo la radianza media sul pixel.



**Figura 4.8.7.** - Immagine a colori (RGB) mosaicata e sovrapposto il reticolato dei pixel rilevati da Lansat-8 proiettati sulla superficie terrestre. Il rettangolo bordato in rosso identifica l'area a cui si applica la precisione metrica dichiarata.

**Figure 4.8.7.** - Color image (RGB) mosaic and superimposed the grid of the pixels detected by Lansat-8 projected on the earth's surface. The rectangle bordered in red identifies the area to which the declared metric precision applies.



**Figura 4.8.8.** - Ortomosaico termico acquisito il 19 luglio 2019. Le temperature sono derivate in base ad una emissività 0.95 costante su tutte le immagini (da Masina et al., 2020).

**Figure 4.8.8.** - Thermal orthomosaic acquired on 19 July 2019. Temperatures are derived based on a constant 0.95 emissivity on all images (da Masina et al., 2020).

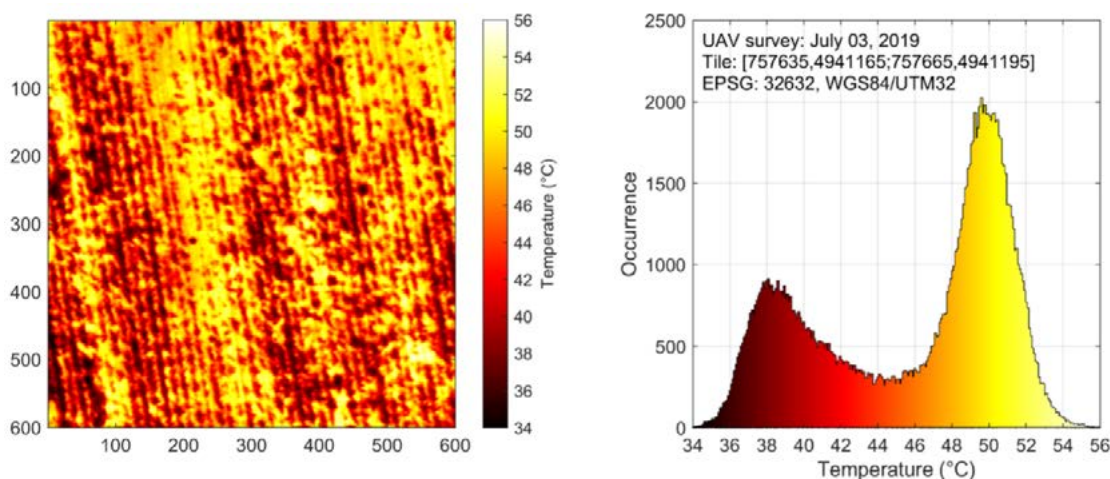
Per quanto riguarda la emissività, bisogna conoscerla per le superfici (una nel nostro caso) su cui è misurata la temperatura per calibrare la termocamera, nonché sulle singole classi identificabili nella superficie del suolo (nel nostro caso suolo nudo e vegetazione). Bisogna infine porre attenzione a che siano usati valori congruenti di emissività nella interpretazione delle immagini da drone e da satellite, tenendo conto che una differenza dell'1% di emissività corrisponde a circa 0,8 °C. La termocamera utilizza un unico valore di emissività (95%) nel convertire le temperature, per cui riconosciute le diverse classi sulla immagine originale i valori possono essere e sono stati corretti tenendo conto delle emissività proprie delle singole classi: 84% per la piastra di plastica bianca su cui era misurata la temperatura, 94-96% per il suolo al crescere della umidità superficiale, 98-99% per la vegetazione.

Per valutare l'effetto dell'atmosfera sulla radiazione che l'attraversa sono disponibili diversi metodi; noi ne abbiamo utilizzati due uno denominato Split Window e l'altro facente riferimento alla equazione

di trasferimento della radiazione (RTE), metodi che si sono mostrati circa equivalenti.

Con questi accorgimenti le temperature medie sul pixel sono state convalidate entro un margine di 1°C. Se per semplificare la valutazione della temperatura da satellite non si considerano gli effetti dell'atmosfera, i soli che influiscono su questa valutazione in quanto la emissività della superficie terrestre è valutata internamente dalla procedura, la temperatura è sovrastimata mediamente di circa 4°C.

La figura 4.8.9 seguente rappresenta l'immagine termica di un tile (392) rilevato il 3/7/2019 nel campo di mais oggetto di monitoraggio all'inizio della levata. A destra la distribuzione di frequenza della temperatura sul tile; il carattere bimodale consente di riconoscere la vegetazione, più fresca, dal suolo nudo, più caldo. Si vede bene la organizzazione in filari della coltura, ma anche come si alternino filari in cui la coltura è vigorosa con altri in cui la vegetazione stressata lascia il suolo scoperto.

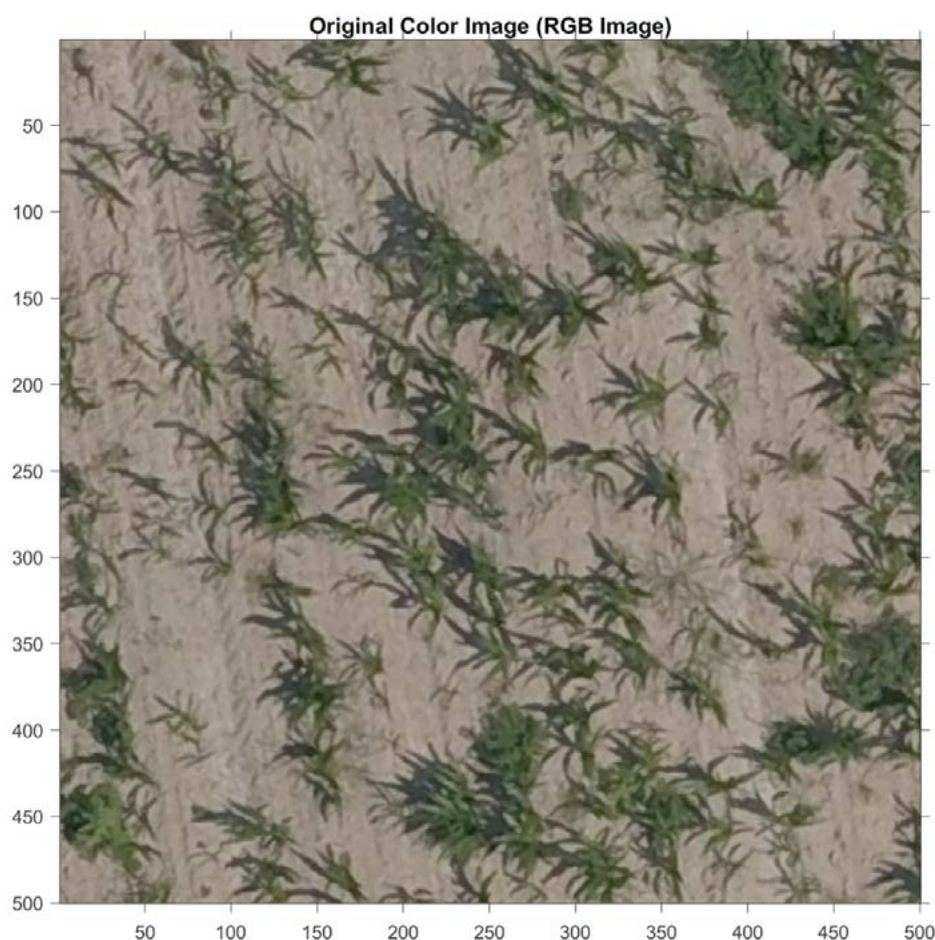


**Figura 4.8.9.** - Un tile 30x30 m della immagine termica e la distribuzione di temperatura su di esso prima della correzione (da Masina et al., 2020).

**Figure 4.8.9.** - A 30x30 m tile of the thermal image and the temperature distribution on it before correction (da Masina et al., 2020).

L'immagine e la statistica si riferiscono al rilievo originale; le due temperature tipiche (i due picchi di una mistura binormale) della vegetazione e del suolo sono inizialmente 39,5 °C 49,7 °C; a seguito della correzione della emissività diventano rispettivamente

te 35,0 e 45,4 °C. La contemporanea temperatura dell'aria era di 30,6 °C, il rilievo é effettuato intorno alle ore 12:00 legali. Il rilievo precede un evento di irrigazione per cui il suolo é secco e la coltura é in leggero stress idrico.



**Figura 4.8.10.** - Un tile 10x10 m del reticolo Sentinel-2 tratto dal rilievo a colori (risoluzione 2 cm). Si nota la maggior risoluzione rispetto alla immagine termica che consente di riconoscere le singole foglie.

**Figure 4.8.10.** - A 10x10 m tile of the Sentinel-2 grid taken from the color relief (resolution 2 cm). You can see the higher resolution compared to the thermal image that allows you to recognize the individual leaves.

Il rilievo a colori, dopo mosaicatura che consente di unificare le immagini singole largamente ridondanti e referenziazione, può essere ritagliato per la parte di interesse. La figura 4.8.10 mostra un esempio relativo al tile 180 del reticolo di pixel rilevati da Sentinel-2 proiettato sulla superficie terrestre. In questi rilievi a colori i dettagli delle singole piante risultano ben visibili.

Il 26/06/2019 è stato effettuato un rilievo multispettrale che, contenendo le bande RED e NIR, consente di valutare il NDVI.

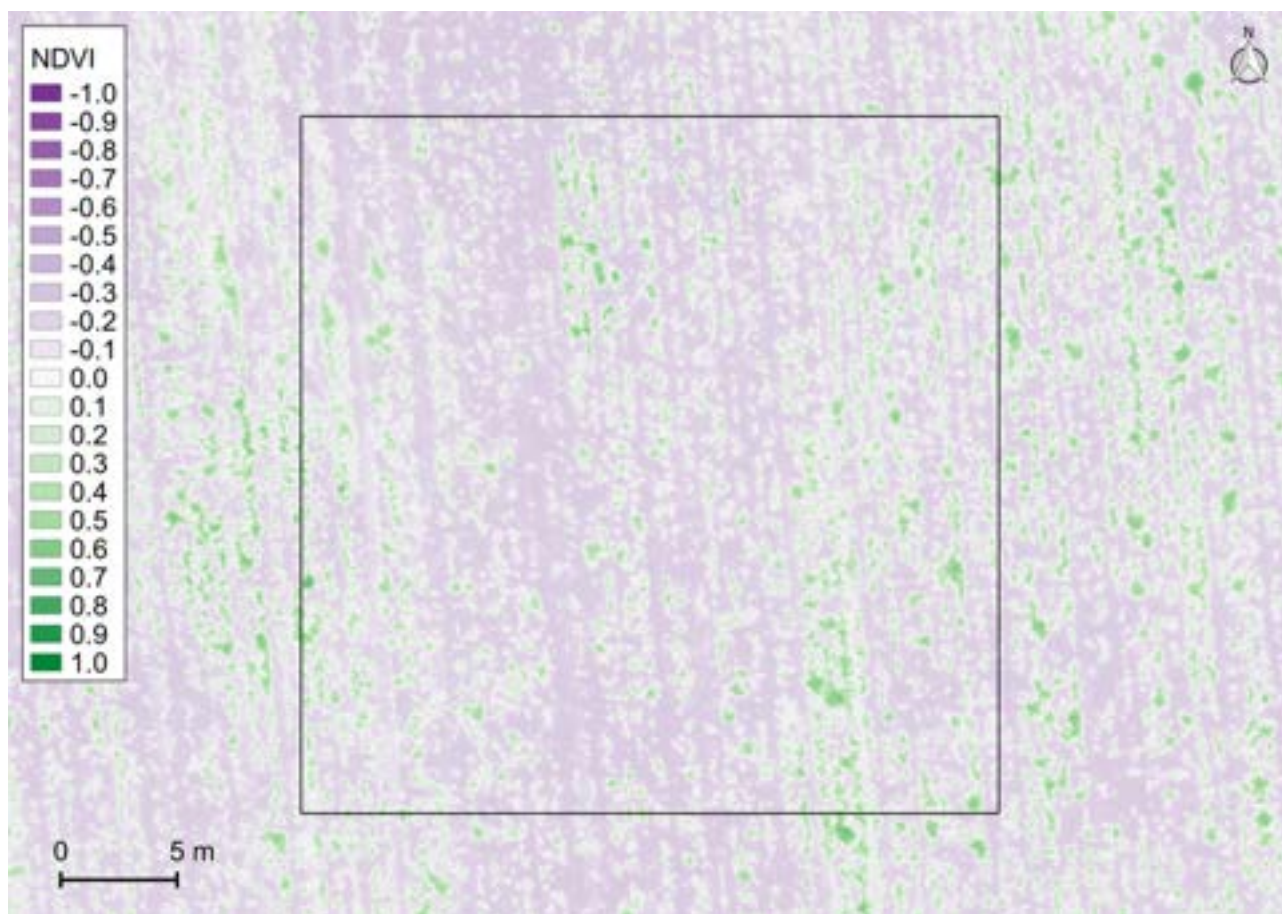
La vegetazione appare verde, il suolo nudo di colore lilla in quanto le bande RED e NIR non corrispondono esattamente a quelle dei satelliti, per cui il suolo

nudo determina valori debolmente negativi invece che debolmente positivi.

Da tutti questi rilievi è possibile ricavare la copertura della vegetazione (canopy cover) ma anche la struttura della copertura vegetale composta di filari e zone alterne di maggiore e minore copertura come si possono osservare bene nelle figure 4.8.9, .10 e .11.

La mancata copertura, con struttura orientata secondo i filari, si determina fin dalla germinazione ed è ben visibile fino alla fine della levata; trova inoltre un riscontro preciso nelle immagini satellitari di NDVI ma anche sulle mappe di produzione al raccolto, tanto nell'annata 2018 che nel 2019.





**Figura 4.8.11.** - Immagine NDVI desunta dall'unico rilievo multispettrale del 26/06/2019. Il riquadro indica il tile 314 del reticolo Landsat 8, 30x30 m.

**Figure 4.8.11.** - NDVI image taken from the single multispectral survey of 26/06/2019. The box indicates the 314 tile of the Landsat 8 grid, 30x30 m.

La mancata produzione appare associata a zone specifiche dei campi ma anche alla struttura dei filari determinata dalla semina, come se la seminatrice avesse un comportamento difettoso o determini una semina non adeguata su alcuni suoli del campo, che appaiono essere quelli sabbiosi che più rapidamente si seccano in superficie.

#### 4.8.3. Conclusioni

Per quanto attiene l'obiettivo specifico della analisi, il rilievo termico ha consentito di evidenziare gli accorgimenti necessari ad una corretta valutazione delle temperature, sia per i rilievi da drone che per quelli da satellite:

- utilizzare gli stessi precisi valori della emissività della superficie del suolo e
- applicare una correzione degli effetti dell'atmosfera sulla radiazione che, emessa dalla superficie terrestre, perviene al satellite.

Ciò fatto il confronto è positivo e le temperature desunte da satellite sono affidabili, così come l'evaporazione da queste derivata.

Il rilievo di dettaglio della struttura spaziale della vegetazione ha consentito di evidenziare le modalità con cui si manifesta la scarsa produzione, suggerendo possibili cause di questa e prospettando soluzioni possibili.

## 5. APPLICAZIONE DI SMART AGROWETLANDS NELLA SPAGNA MEDITERRANEA

In the 2019 the application of the DSS Smart Agrowetlands was replicated in Elche, Spain, on an alfalfa field where a mini-network of wireless sensors (WSN) was installed. In this case the forecast model used for the formulation of the irrigation advice was the SALTIRSOIL model rather than the FAO AquaCrop adopted in the Italian pilot area. Three simulations with three different climatic scenarios were set up: a dry, a wet, and average precipitation year. According to the DSS, to guarantee 90% of the alfalfa yield the irrigation volumes per each scenario should be respectively of 1960 mm distributed

in 24 doses, 690 mm distributed in 9 doses, and 1540 mm distributed in 19 doses. The first and third management options are unsustainable in the area due to the restricted water availability and the rigidity of the irrigation shift. The second option is the more cost-effective solution and similar to the irrigation approach already applied by the local farmers, which consists in a total irrigation amount ranging from 720 to 960 mm year<sup>-1</sup>, distributed in doses of 80 mm every 20-30 days, allowing to reach 80-85% of the alfalfa yield.

### 5.1. - CARATTERISTICHE DELL'AREA DEI CARRIZALES DI ELCHE

L'applicazione del sistema di supporto alle decisioni Smart Agrowetland è stata replicata anche in un'altra area del bacino mediterraneo affetta da problemi di salinità, Carrizales. Quest'area si trova a sud-est della penisola iberica, nella provincia di Alicante, all'interno della regione Baix Vinalopó, nella vecchia laguna di Elche, formando un corridoio ecologico tra i Parchi Naturali di Hondo e le Salinas de Santa Pola. Il territorio, eminentemente agricolo, occupa circa 1.600 ettari, dove troviamo varie colture, da ortaggi, cereali, frutta come meloni a colture arboree

come i melograni. Il territorio è caratterizzato da una complessa morfologia, essendo solcato da un'articolata rete di canali d'irrigazione e drenaggio di eredità araba e da stagni o "pantanet" che costituiscono una componente fondamentale del Parco Naturale Salinas de Santa Pola. I suoli nell'area sono generalmente di limosi-argillosi, ad alto contenuto di materia organica (> 2%), molto ricchi di carbonato di calcio (> 40%), e con densità moderata (< 1,4 g cm<sup>-3</sup>). La conducibilità elettrica dell'acqua di irrigazione nella zona di Carrizales è altamente variabile e può andare da 1 a 8 dS m<sup>-1</sup>, con una media di 4 dS m<sup>-1</sup> (Tabella 1).

Prof. (cm)	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Tessitura (USDA)	Sostanza Organica (%)	Carbonato di calcio (%)	pH	Densità (g cm <sup>-3</sup> )
0-10	50.7	42.8	6.5	Limoso-argilloso	3.03	48.3	8.05	1.16
10-30	55.3	40.7	4.0	Limoso-argilloso	2.22	47.5	8.02	1.29
30-60	54.5	41	4.5	Limoso-argilloso	1.84	52.8	7.64	1.37
60-90	52.7	42.8	4.5	Limoso-argilloso	1.08	59.5	7.82	--

**Tabella 5.1.1.** - *Principali caratteristiche del suolo nel campo dimostrativo di Carrizales.*

**Table 5.1.1.** - *Main soil features in the Carrizales demonstration field.*

L'applicazione di Smart Agrowetland II in quest'area è stata possibile grazie alla collaborazione con un gruppo di ricercatori dell'Institut Valencià d'Investigacions Agràries (IVIA) di Valencia che ha messo a punto un modello, SALTIRSOIL (SALTs in IRrigated SOILs), in grado di prevedere la salinità del suolo in aree soggette ad irrigazione con acque di scarsa qualità e di generare una raccomandazione di gestione irrigua. L'applicazione del DSS Smart Agrowetland in Spagna, dunque, si è basata sull'uso del modello SALTIRSOIL piuttosto che sul modello AquaCrop della FAO adottato nell'area pilota italiana.

## 5.2. RETE WSN INSTALLATA

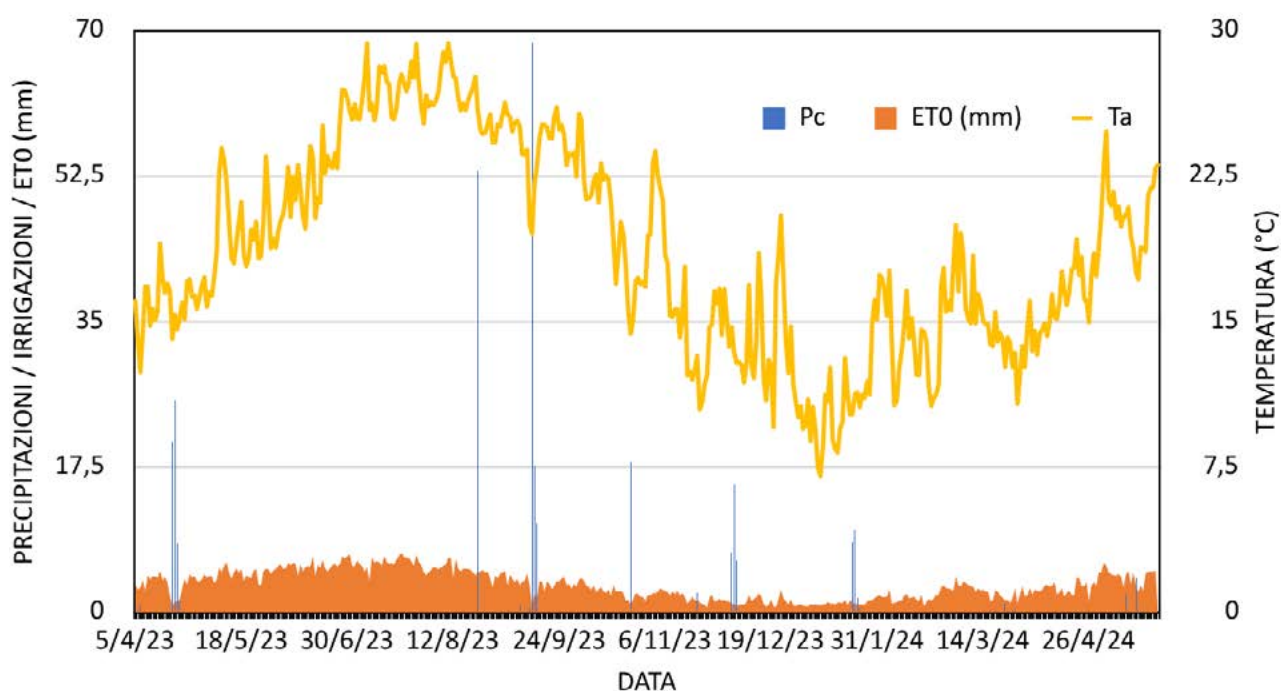
Nella primavera 2019 è stata installata nel campo dimostrativo selezionato nella zona di Carrizales una mini-rete di sensori wireless (WSN) analoga a quella italiana,

che monitora in continuo i parametri meteorologici ed ambientali necessari per il funzionamento del DSS. Questa rete include una stazione meteorologica, quattro sensori GS3 (Meter-Group) per misurare la temperatura, la conducibilità elettrica del suolo a 25 oC e il contenuto idrico volumetrico in 3 punti del campo a 50 cm di profondità, una sonda TriSCAN (Sentek) per monitorare la salinità e il contenuto idrico del suolo a diverse profondità, tre sensori CTD per misurare la salinità e l'altezza dell'acqua nei canali di irrigazione e drenaggio e un piezometro per monitorare l'altezza e la salinità dell'acqua di falda, (Figura 5.2.1). I principali dati meteorologici e ambientali dell'area dal momento dell'installazione dei sensori ad oggi sono riassunti in figura 5.2.2.



**Figura 5.1.1.** - Rete wireless di sensori installata nel campo dimostrativo di Carrizales. M1: nodo coordinatore con stazione meteorologica e sensore GS3 per la misura di umidità, salinità e temperatura del terreno. S1: nodo router con idrometro nel canale a valle del campo, dove si raccoglie l'acqua di drenaggio (sensore CTD per livello, salinità e temperatura dell'acqua) e sensore per il suolo (sensore GS3 per umidità, salinità e temperatura del terreno). P1: nodo router con piezometro per la caratterizzazione della falda (sensore CTD per la misura di livello, temperatura e salinità dell'acqua) e del suolo (GS3 per umidità, salinità e temperatura del terreno) e sonda SENTEK (per la misura di umidità, temperatura e salinità a sei diverse profondità del terreno). I1: nodo router con idrometro nel canale di testata del campo, da cui si preleva l'acqua di irrigazione (sensore CTD per livello, salinità e temperatura dell'acqua).

**Figure 5.1.1.** - WSN installed in the Carrizales demonstration field. M1: coordinator node with a weather station (rainfall, air temperature and humidity, wind and solar radiation) and a soil sensor (GS3 for soil humidity, salinity, and temperature). S1: router node with sensor in the field drainage channel (CTD for water level, salinity and temperature) and GS3 sensor. Node P1: piezometer for groundwater (CTD for level, temperature, and salinity), a GS3 sensor and SENTEK probe (soil temperature, humidity, and salinity at six different depths). Node I1: sensor in the irrigation conduit (CTD for water level, salinity, and temperature).



**Figura 5.2.2.** - Andamento di temperatura, evapotraspirazione di riferimento (ET0, mm/giorno) nel campo dimostrativo di Carrizales dall'installazione della rete WSN ad oggi, con le precipitazioni avvenute sulla coltura di erba medica nell'annata 2018/2019.

**Figure 5.2.2.** - Temperature, potential evapotranspiration (ET0, mm/day) pattern in the Carrizales demonstration field from the WSN installation to date, with precipitation occurred on the alfalfa crop cultivated in field during the 2018/2019 productive season.

### 5.3. - COLTIVAZIONE E GESTIONE DEL CAMPO DIMOSTRATIVO

Nel 2019 il campo dimostrativo è stato coltivato con erba medica. La coltura è stata seminata il primo novembre 2018 ed è stata interrotta il 15 settembre 2019 a causa di un'alluvione (Figura 1) che ha provocato una sommersione prolungata del campo causando la morte della coltura per asfissia.

Gli agricoltori locali generalmente irrigano l'erba medica con una quantità d'acqua compresa tra 720 e 960 mm all'anno, distribuita in dosi di 80 mm applicate ogni 20 giorni durante il peridio di più alto fabbisogno idrico, vale a dire la stagione estiva, e ogni 30 giorni durante il periodo di basso fabbisogno idrico della coltura. Il principale sistema di irrigazione adottato è l'allagamento. Poiché la

falda acquifera è poco profonda e ricca di sali, tutti i campi hanno una rete di tubi di drenaggio posti a circa ad 80 cm di profondità. Questo sistema non solo assicura che la falda acquifera sia mantenuta ad una profondità minima di 80 cm ma garantisce anche il drenaggio dell'acqua in eccesso insieme ai sali del suolo.

Le informazioni raccolte dal piezometro installato sul campo hanno, infatti, constatato che gli eventi di irrigazione non hanno aumentato il livello della falda, che quasi sempre si è mantenuta ad una profondità di circa 70 cm (Figura 3). Solo in caso di piogge molto abbondanti si sono manifestati degli innalzamenti del livello di falda che talvolta è arrivata ad invadere gli strati di terreno esplorati dalle radici con conseguenze dannose sul raccolto, principalmente



a causa dell'instaurazione di condizioni di ipossia radicale e di alta concentrazione salina (Figura 3).

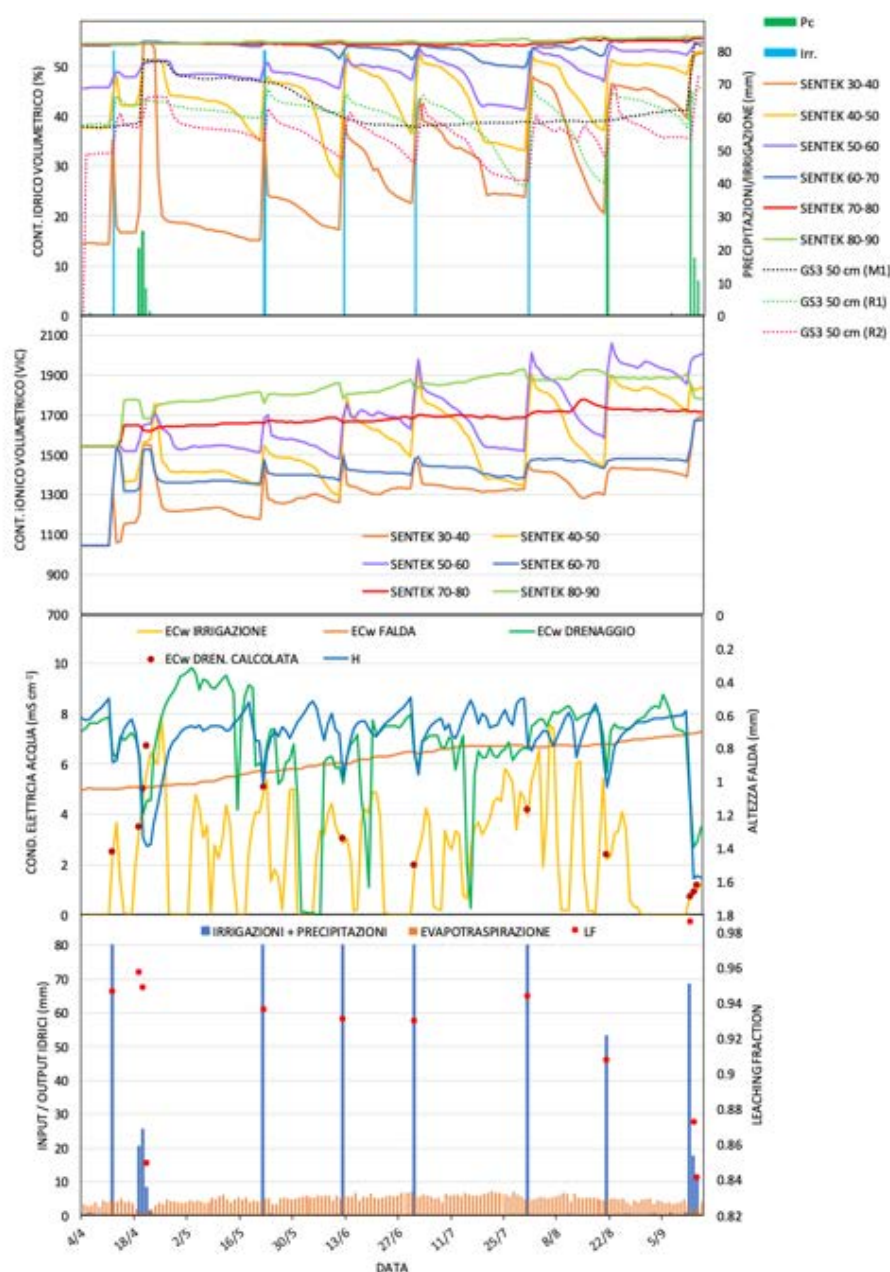
Al fine di validare le misurazioni effettuate dalla rete wireless di sensori e confermare la conformità dei dati per l'uso all'interno del DSS-SALTIRSOIL, è stata effettuata una serie di campionamenti di suolo ad intervalli temporali regolari e sono stati determinati la conducibilità elettrica a 25 °C, il contenuto idrico, la densità apparente, il contenuto di sostanza organica, il contenuto di carbonato di calcio e il pH. In totale, il campo è stato campionato 6 volte: ottobre 2019, 11/08/2019, 21/11/2019, 23/12/2019, 3/2/2020, 13/2/2020. Per ogni campionamento sono stati selezionati tre punti del campo, in prossimità dei punti di installazione dei sensori, e sono stati prelevati campioni di suolo ai seguenti intervalli di profondità: 0-20, 20-40, 40-60, 60-90. È stato inoltre campionato un ulteriore punto al centro del campo. Nelle stesse date, è stata anche misurata manualmente la profondità della falda acquifera nei punti di campionamento del suolo. Queste determinazioni sono ancora in corso a causa dei rallentamenti verificatisi nel contesto emergenziale connesso alla pandemia da coronavirus

L'andamento dell'umidità e della salinità del terreno in funzione di pioggia ( $P_c$ ) e irrigazione ( $I_{rr}$ ), l'andamento del livello ( $H$ ) e della salinità ( $EC_w$  FALDA) dell'acqua di falda, la qualità dell'acqua di irrigazione ( $EC_w$  IRRIGAZIONE) e dell'acqua di drenaggio ( $EC_w$  DRENAGGIO), con un calcolo della frazione di acqua persa per lisciviazione (Leaching Fraction, LF) sono illustrati nella figura 3. La frazione di acqua persa per percolazione è stata calcolata per differenza, sottraendo dagli input idrici (precipitazioni e irrigazioni) le perdite per evapotraspirazione. Il LF è stato calcolato applicando la seguente equazione (quaderno FAO 29, Ayers and Westcot, 1989):

Noto il LF e la salinità dell'acqua di irrigazione, è possibile fare una stima della salinità dell'acqua di drenaggio, applicando la seguente equazione (quaderno FAO 29, Ayers and Westcot, 1989):

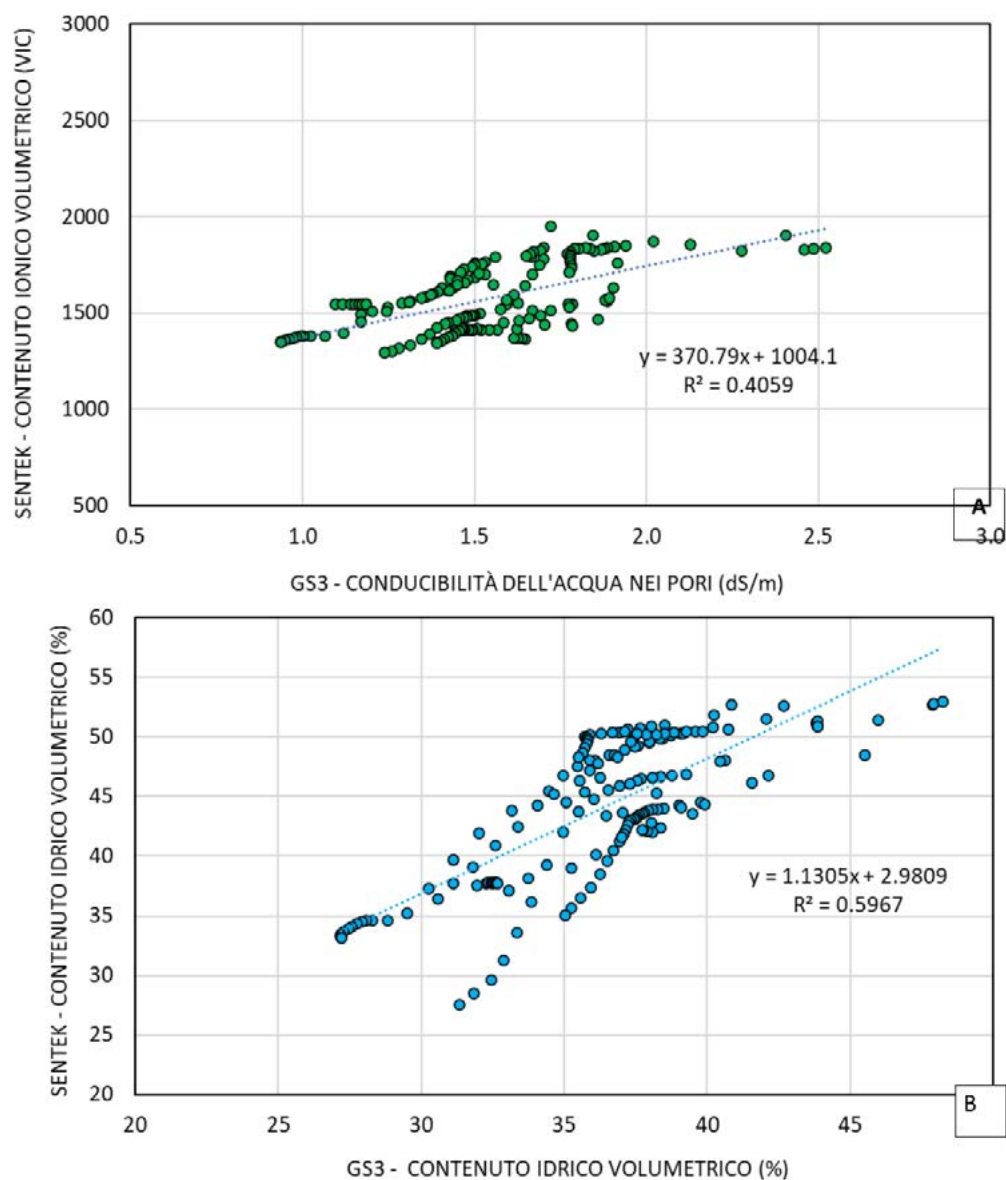
Sebbene il metodo di irrigazione per allagamento non sia annoverato tra i più sostenibili a livello di consumi e di efficienza d'uso dell'acqua, è importante sottolineare che questa tecnica associata ai volumi generalmente applicati consente di svolgere un'importante azione di lisciviazione dei sali al di sotto della zona esplorata dalle radici. Come mostrato in figura 3D, infatti, circa il 90% dell'acqua distribuita nel terreno con l'irrigazione si allontana dal suolo come acqua di drenaggio (leaching fraction), portando con sé i sali in eccesso. Dalla figura 3C, infatti, si può osservare che la salinità dell'acqua di percolazione, misurata dall'idrometro posto nel canale di fondo del campo dove si raccolgono le acque di drenaggio, è generalmente superiore alla salinità dell'acqua di irrigazione, proprio perché si carica anche dei sali precedentemente accumulati nel terreno.

Nella figura 4A è rappresentata la retta di regressione tra la misura di salinità del terreno eseguita dalla sonda SENTEK a circa 50 cm di profondità, espressa sotto forma di contenuto ionico volumetrico (VIC), e la misura di salinità eseguita dal sensore GS3, espressa in termini di conducibilità elettrica dell'acqua nei pori ( $dS\ m^{-1}$ ), installata in prossimità della sonda SENTEK. La correlazione tra le due misure risulta fortemente significativa ( $R=0.63$ ,  $n-1=165$ ). Nella figura 4B, invece, è mostrata la retta di regressione tra le misure del contenuto idrico volumetrico del terreno eseguite dalla sonda SENTEK e dalla sonda GS3 che, anche in questo caso, mostrano una buona correlazione ( $R=0.77$ ,  $n-1=165$ ).



**Figura 5.3.1.** - Andamento del A) contenuto idrico volumetrico misurato dalla sonda SENTEK a sei diverse profondità del terreno e dai sensori GS3 posizionati nei nodi S1, P1 ed M1, B) livello di salinità, espresso come contenuto ionico volumetrico, misurato a sei diverse profondità di terreno dalla sonda SENTEK, C) livello e salinità dell'acqua di falda misurati dal piezometro posizionato nel nodo R2, salinità dell'acqua di irrigazione e dell'acqua di drenaggio misurate rispettivamente dagli idrometri posizionati nei nodi R3 e R1 e salinità dell'acqua di drenaggio calcolata (Ayers and Westcot, 1989) e D) differenza tra gli input idrici (precipitazioni + irrigazione) e le perdite per evapotraspirazione per la stima della quantità d'acqua di drenaggio e il calcolo del leaching fraction (LF) nel campo dimostrativo di Carrizales dalla data di installazione della rete WSN alla chiusura del ciclo produttivo.

**Figure 5.3.1.** - Trend of A) soil volumetric water content measured by the SENTEK probe at six progressive ground depths and by the GS3 sensors (50 cm depth), placed in the nodes S1, P1 and M1, B) salinity content, expressed as volumetric ion content, measured at six progressive ground depths by the SENTEK probe, C) groundwater level and salinity measured by the sensor in the piezometer located in the R2 node, salinity of irrigation drainage water measured by the CTD10 sensors located in the I1 and S1 nodes, and estimated salinity of the drainage water and, D) difference between the hydrologic input (precipitation + irrigation) and water lost by evapotranspiration for estimating the amount of drainage water and calculating the leaching fraction (LF) in the Carrizales demonstration field.



**Figura 5.3.2.** - Correlazione tra A) la misura di salinità e B) la misura del contenuto idrico volumetrico del terreno a 50 cm di profondità eseguite dalla sonda SENTEK e dalla sonda GS3.

**Figure 5.3.2.** - Regression lines between A) the soil salinity values and, B) the soil volumetric water content values at 50 cm depth, measured by the SENTEK and the GS3 sensors.

## 5.4. GESTIONE DELLE RACCOMANDAZIONI IRRIGUE

Le informazioni fornite dalla rete WSN sono state utilizzate dapprima da sole e poi in combinazione con il DSS-SALTIRSOIL per fornire diverse raccomandazioni irrigue a beneficio di tutti gli agricoltori

della zona di Carrizales.

### 1. Raccomandazioni sulla gestione irrigua basate sulle sole informazioni raccolte dalla rete di sensori wireless

#### • Sensori di contenuto idrico del suolo:

Le informazioni ottenute dai sensori indicano che la gestione irrigua seguita dagli agricoltori è adeguata alle colture con sistemi di radicamento profondo

come l'erba medica. Questa gestione non solo garantisce il mantenimento di un adeguato contenuto idrico nella zona di maggiore assorbimento idrico dalle radici (primi 50 cm del terreno) ma assicura anche il controllo della salinità entro i limiti di tolleranza della coltura grazie ad una azione di lisciviazione dei sali in eccesso insieme con le acque di percolazione (figura 5). Tuttavia, per le colture con una profondità di radicamento più bassa, come melone e broccoli, i turni irrigui dovrebbero essere più frequenti e con volumi inferiori a 80 mm. Per queste ultime colture, che di solito sono inserite in rotazione con colture dotate di un apparato radicale più profondo, potrebbe essere valutata l'applicazione di tecniche irrigue caratterizzate da maggiore efficienza d'uso dell'acqua, come l'irrigazione a goccia.

#### • Sensori di salinità del suolo:

Per quanto riguarda la salinità del suolo, la conducibilità elettrica dell'estratto saturo (ECe) nei primi 40 cm di profondità si è mantenuta in valori compresi tra 2 a 3,5 dSm<sup>-1</sup> mentre a 50 cm di profondità ha subito un incremento raggiungendo valori tra 4 e 5 dSm<sup>-1</sup> (figura 7). Questi valori sono vicini alla soglia di tolleranza dell'erba medica, che subisce un calo al 90% della resa potenziale già ad un livello di salinità pari a 3,37 dS m<sup>-1</sup>.

L'assenza di irrigazione e, quindi, di drenaggio si tradurrebbe in un livello di salinità dannoso anche per le colture più tolleranti coltivate nella zona, come rivelato dal sensore installato al nodo M1 in un campo non irrigato nelle vicinanze che ha registrato valori di ECe pari a 6-7 dS m<sup>-1</sup> a 50 cm di profondità nel corso della medesima stagione colturale (figura 5.4.1). Di conseguenza, l'irrigazione e il drenaggio sono indispensabili per mantenere la salinità del suolo a livelli che consentano colture mediamente tolleranti come carciofi e medica (ECb inferiore a 2 dS m<sup>-1</sup>) nella zona di Carrizales.

## 2. Raccomandazioni sui consigli irrigui generati dal DSS-SALTIRSOIL

### con i dati raccolti dalla rete WSN

Come è stato mostrato, le sole informazioni fornite dal WSN potrebbero essere sufficienti a guidare la gestione irrigua, ma la loro applicazione risulta ancora più mirata se le osservazioni raccolte dai sensori sono usate per alimentare un sistema di supporto decisionale. A tal fine i dati della rete WSN sono stati utilizzati per eseguire diverse simulazioni con il modello SALTIRSOIL.

Una parte dei dati sono stati dapprima usati per calibrare e validare il modello. Gli output della modellazione sull'andamento di conducibilità dell'acqua di drenaggio (ECd), conducibilità apparente del suolo (ECb) e contenuto idrico del suolo sono stati confrontati con i dati registrati dai sensori appartenenti al WSN. Come si può osservare nelle figure 5.4.1, .2 e .3, è risultata una buona sovrapposizione tra i dati simulati e quelli osservati, confermando l'adequatezza del modello SALTIRSOIL per le specifiche condizioni di Carrizales.

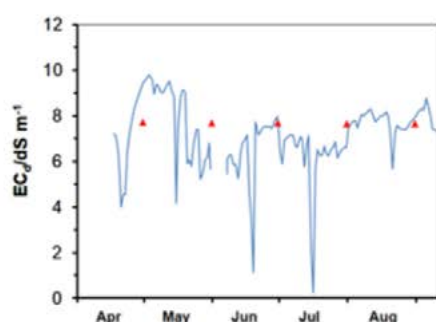
Successivamente è stata svolta una raccolta bibliografica delle principali caratteristiche colturali dell'erba medica, inclusi i coefficienti colturali e la durata delle sue principali fasi fenologiche (quaderno FAO 56), che sono stati poi inclusi nel database on-line del DSS-SALTIRSOIL.

Sono state, quindi, impostate tre simulazioni, prendendo in considerazione tre diversi scenari tipici di precipitazione annuale che potrebbero verificarsi nell'area: condizioni di clima estremamente secco (precipitazione media annuale di 123 mm), condizioni di clima umido (precipitazione media annuale di 432 mm) e condizioni intermedia fra le precedenti (precipitazione media annuale di 238 mm). Come modello di riferimento per questi tre scenari sono stati selezionati rispettivamente gli anni 2014, 2007 e 2016.

Al fine di garantire il 90% della resa per l'erba medica i volumi irrigui da distribuire per ciascuno dei tre scenari climatici considerati dovrebbero essere:

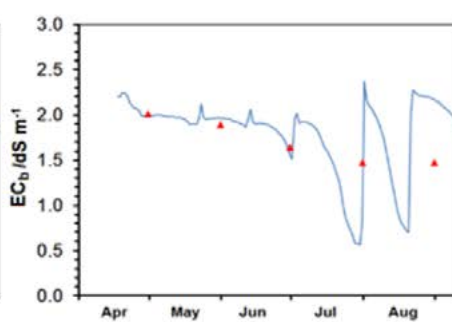
- 1960 mm nell'anno secco con una precipitazione di 125 mm. Questa quantità di acqua, che dovrebbe





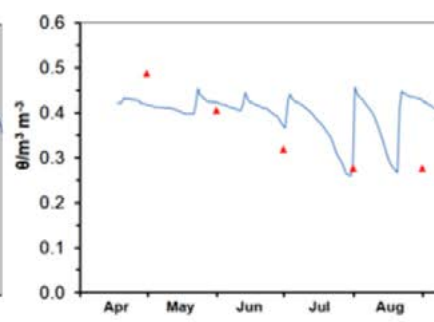
**Figura 5** - Conducibilità elettrica dell'acqua di drenaggio a 25 °C ( $EC_d$ ), misurata dal sensore (blu) e simulata dal modello (rosso).

**Figure 5** - Electrical conductivity of drainage water at 25 °C ( $EC_d$ ) measured by the sensor (blue) and simulated by the model (red).



**Figura 6** - Conducibilità elettrica del suolo a 25° a 50 cm di profondità ( $EC_b$ ), misurato dal sensore GS3 in (blu) e simulata dal modello (rosso).

**Figure 6** - Electrical conductivity of the soil at 25 °C and 50 cm depth ( $EC_b$ ) measured by the GS3 sensor (blue) and simulated by the model (red).



**Figura 7** - Contenuto idrico del suolo a una profondità di 50 cm, misurato dal sensore GS3 (blu) e simulata dal modello (rosso).

**Figure 7** - Soil water content at 50cm depth, measured by the GS3 sensor (blue) and simulated by the model (red).

essere distribuita in 24 giorni (tabella 2), supererebbe ampiamente le possibilità dell'offerta irrigua nella zona perché l'intervallo tra gli eventi di irrigazione dovrebbe essere ridotto da 20 a 10 giorni durante l'estate e da 30 a 20 giorni per il resto dell'anno. Tale criterio di gestione, dunque, risulta insostenibile nell'area considerata a causa della rigidità dei turni irrigui che hanno una cadenza minima di 20 giorni.

- 690 mm nell'anno umido con una pioggia di 432 mm. Questa quantità di acqua dovrebbe essere

distribuita in 9 interventi irrigui. Questo approccio risulta più conveniente nella zona considerata date le limitazioni imposte dai turni irrigui.

- 1540 mm nell'anno medio con una pioggia di 238 mm. Questa quantità di acqua dovrebbe essere distribuita in 19 dosi di 80mm ogni 15 giorni durante l'estate e ogni 25 giorni per il resto dell'anno. Questa programmazione dell'irrigazione risulta difficile da realizzare nell'area considerata a causa della carenza idrica che si manifesta durante i periodi di siccità estiva.

Scenario climatico	Precipitazioni (mm anno <sup>-1</sup> )	Irrigazioni (mm anno <sup>-1</sup> )	No irrigazioni/anno
Clima secco	123	1690	24
Clima intermedio	238	1540	19
Clima umido	432	690	9
Gestione irrigua tipica dell'area	---	720-960	9-12

**Tabella 5.4.1.** - Volumi irrigui annuali raccomandate dal DSS-SALTIRSOIL per raggiungere almeno il 90% della resa di erba medica in diversi scenari di precipitazioni nell'area di Carrizales

**Table 5.4.1.** - Annual irrigation volumes recommended by DSS-SALTIRSOIL to reach at least 90% of alfalfa yield in different precipitation scenarios in the Carrizales area

Alla luce di queste simulazioni, l'irrigazione generalmente applicata dagli agricoltori locali sull'erba medica consentirebbe di raggiungere tra l'80 e l'85%

della resa massima, dimostrandosi la gestione più sostenibile che si possa applicare su questa coltura nella zona di Carrizales.

## 6. CONCLUSIONI

The functioning of the two sensor networks, the interface portal with the farmer and the model, core of the watering advice system, are discussed in order to highlight the positive aspects and the possible improvements. Finally, the activities that make up the "after LIFE program" are outlined.

Obiettivo primario del progetto era implementare un sistema di supporto alle decisioni che agevolasse l'agricoltore nella scelta di quando e quanto irrigare basato sui dati agroidrologici acquisiti da una rete di sensori di misura delle condizioni meteorologiche, della umidità e salinità dei suoli e del livello e salinità dell'acqua nei canali ed in falda, ed un modello previsionale di crescita della coltura sotto l'influenza della salinità del suolo e dei corpi idrici. Per simulare lo sviluppo della coltura si è valutato idoneo il modello AquaCrop messo a punto dalla FAO ed utilizzato in diversi ambienti a rischio di salinizzazione.

Per questo si è realizzata la rete di sensori ed implementato il portale per l'accesso ai dati acquisiti; si è inoltre implementato il modello AquaCrop predisponendo i dati necessari per il suo utilizzo nei campi sperimentali. Riassumiamo qui le conclusioni punto per punto, chiudendo poi con una prospettiva sull'utilizzo futuro degli strumenti predisposti.

### 6.1. - LA RETE

Le reti installate sia nell'area di studio italiana attorno a Mandriole (RA) sia in quella spagnola di Carrizales hanno funzionato nel complesso bene con qualche problema di continuità nel tempo per malfunzionamenti di varia origine, quasi assenti nella rete spagnola (che ha anche registrato senza danni le condizioni associate al verificarsi di un evento estremo) ma più frequenti in quella italiana.

I malfunzionamenti sono dovuti a danneggiamenti dell'hardware, a difetti di trasmissione, raramente a batterie scariche.

I danni hardware sono stati più frequenti sui sensori installati nei canali, si presume per la azione di nutrie che attratte dal campo magnetico o alla ricerca di cibo hanno rosicchiato e tagliato i cavi. In un caso è stato appiccato un incendio alla vegetazione della sponda e questo ha distrutto il cavo.

In alcuni casi i sensori nel suolo sono stati danneggiati dal passaggio di macchine agricole pesanti o da una aratura oltre la profondità prevista.

Qualche sensore, particolarmente quelli di livello, sono stati soggetti a deriva fornendo indicazioni non più riferite al riferimento imposto.

### 6.2. - IL PORTALE

Il portale è lo strumento che consente all'agricoltore un facile accesso ai dati acquisiti dalla rete, alle previsioni meteo, ai dati sulla irrigazione praticata ed ai consigli irrigui forniti.

Si è cercato di renderlo di più facile impiego fornendo per ogni appezzamento o agricoltore l'informazione necessaria per la gestione di quell'appezzamento, filtrando i tanti dati che riguardano altri appezzamenti.

L'agricoltore deve immettere i dati relativi alla coltura praticata (varietà e data di semina) ed alle irrigazioni effettuate (data, quantità e qualità).

Il sistema fornisce due volte per settimana:

- il tempo efficace trascorso dalla semina in forma di gradi-giorno,
- lo stato del campo e della coltura (acqua utilizzabile presente nel suolo e sua salinità, profondità delle radici, copertura della vegetazione),
- il consiglio irriguo (data e lama d'acqua previste per la prossima irrigazione e la successiva) e
- la previsione di resa al raccolto (biomassa secca per ettaro e perdita percentuale per stress da sale).

Stato e consiglio vengono memorizzati e possono essere rivisti in rapida successione per analizzare meglio a posteriori la resa del campo.

Difficile esprimere un giudizio sulla efficacia dello strumento perché l'inerzia degli agricoltori a cambiare gli usuali strumenti utilizzati nelle loro attività produttive è grande, mentre il tempo utilizzato per proporlo ed adattarlo è stato breve e sovrapposto ad altre attività necessarie per la chiusura del progetto.

### 6.3. - IL MODELLO E DSS

Il modello AquaCrop versione 6 si è dimostrato complessivamente idoneo a rappresentare la dinamica dei sali nel suolo, pur con il vincolo di dover fornire al modello i livelli e la salinità della falda, che in prototipo sono dipendenti anche dalla intensità e salinità dei flussi d'acqua di percolazione.

La idoneità è testimoniata dalla corretta rappresentazione di alcuni fatti osservati:

- come rilevato dalla colonna di sensori Sentek, nel periodo estivo l'acqua di irrigazione non penetra in profondità perché, essendo la percolazione fortemente limitata dalla bassa permeabilità dei suoli, l'acqua assorbita dal suolo e dalle piante già negli strati superiori viene traspirata dalla vegetazione prima di percolare in profondità.
- la lisciviazione dei suoli nel periodo irriguo è inefficace in suoli argillosi compatti, quasi impermeabili al di sotto dello strato arato; dare al suolo più acqua di quanta è traspirabile, determina soltanto un maggior

apporto di sali, se l'acqua non è ottima, e l'accumulo dell'acqua nel suolo con un inizio di idromorfia, ma non un aumento di produzione;

- si possono rappresentare gli effetti di una subirrigazione, come è stata fatta la irrigazione del 2018 nel campo di Mais biologico dello squadro Marcabò 1; allagando i dreni con acqua di buona qualità, si alimenta una lente di acqua dolce interposta fra il suolo agrario e la falda salata sottostante con riduzione dello stress da sale sulla coltura.

Il principale limite pratico del modello, nella versione con interfaccia grafica adottata, la sola disponibile fino alla fine del 2019, consiste nella immissione manuale dei dati richiesta dalla interfaccia; per rappresentare la variabilità delle condizioni occorre in questo contesto predisporre a mano simulazioni per tutte le combinazioni possibili che possono risultare molto numerose rendendo molto onerosa la gestione del modello.

Da una parte, stante la estensione dei campi di Agrisfera oggetto dello studio (30-60 ha) il suolo non è mai omogeneo; ad es. nel campo seguito nel 2019, Squadro 5, erano presenti suoli da sabbiosi a limo-argillosi; una varietà di suoli meno evidente era presente anche nel campo sperimentale 2018. Per rappresentare questa variabilità si sarebbe dovuto dividere il campo in parcelle omogenee e fornire per ognuna di essi una corretta caratterizzazione del suolo, in luogo delle caratteristiche medie fornite da Agrisfera.

Dall'altra parte, stante la capacità dell'irrigatore (rotolone con irrigazione per strisce larghe circa 120 m), erano necessari 5-8 giorni per irrigare tutto il campo (rispettivamente negli anni 2019-2018) e per di più, per economizzare nei movimenti del pesante irrigatore, esso veniva spostato sul campo in verso opposto in due irrigazioni successive, cosicché l'ultima area servita in una irrigazione era la prima che veniva servita in quella successiva, per cui in sintesi sia i momenti dell'irrigazione sia la durata degli intervalli fra gli interventi sono alquanto variabili da parcella a parcella.

Infine il consiglio irriguo viene formulato ad una certa data a seguito di modellazione in cui tutte le condizioni ambientali dei giorni seguenti sono previste, in particola-

re le precipitazioni e la salinità dell'acqua di irrigazione; la precipitazione è ben noto quanto sia aleatoria; per la salinità dell'acqua di irrigazione, nel 2018 essa è risultata stabile e sempre bassa, ma nel 2019 la fonte utilizzata, canale di scolo Busona, aveva salinità molto variabile e imprevedibile, secondo che in zona arrivassero le acque immesse per irrigazione o le acque molto salate di drenaggio del bacino scolante da aree prossime al litorale.

In sintesi una varietà di condizioni è stata rappresentata tramite la sola condizione media perdendo di vista condizioni di stress che derivano da situazioni specifiche e così facendo la produzione è stata stimata di norma per eccesso.

Fortunatamente i suoli dell'area hanno mediamente una eccellente capacità di accumulo dell'acqua (superiore a 100 mm), mentre per non produrre ristagno la adacquata non doveva superare i 50 mm; sussisteva quindi normalmente un buon margine entro il quale la gestione irrigua si poteva muovere liberamente senza causare sofferenza alle colture, ragion per cui le previsioni di resa delle colture sono risultate ragionevoli sia pur generalmente in eccesso.

Un DSS deterministico per l'irrigazione basato sulla sola umidità dei suoli non consente comunque di cogliere le occasioni offerte dalla variabilità delle condizioni e dalla flessibilità possibile per la gestione. Ad esempio, se è prevista una precipitazione nei giorni a venire e non si è in condizioni di stress idrico, può convenire ritardare l'irrigazione per commisurarla alla precipitazione avvenuta e certa, anziché a quella prevista, od anche, quando la qualità dell'acqua è molto variabile, può convenire irrigare anche prima che ci siano le condizioni previste dal criterio di irrigazione se la qualità dell'acqua è idonea, piuttosto che essere costretti ad irrigare con acqua di qualità incerta quando si raggiungono le condizioni di stress idrico. Tutto questo non è rappresentato dal modello ma è facilmente interpretabile a buon senso dall'utilizzatore a cui sono dati oltre al consiglio anche le informazioni per scegliere se attenersi.

## 6.4. PROSPETTIVE

Il settore degli strumenti informatici a sussidio della agricoltura è un settore dinamico e la agricoltura è un settore fondamentale che continuerà ad attrarre interessi negli anni a venire. Pertanto tutti i partner sono interessati singolarmente e come consorzio a continuare nell'attività.

Winet ha in programma di potenziare il portale che potrà adattare e abbinare alle prossime installazioni in agricoltura.

Agrisfera e il gruppo delle CAB (Cooperative Agricoli Braccianti) del Ravennate, un gruppo di grandi aziende agricole con un servizio tecnico e capacità informatiche superiori alla media delle aziende, hanno apprezzato la esperienza e si attivano per collocarla in nuovi progetti, tramite i quali si potrà meglio finalizzare i prodotti e prendere dimestichezza con gli strumenti approntati.

OSV è interessata alla strumentazione e in generale a consulenze in ambito agricolo.

Unibo è interessata ai risvolti scientifici delle attività ed è disponibile per una azione di trasmissione dei metodi e delle informazioni al mondo operativo.

E' comunque assicurata la continuità di funzionamento della rete WSN, e si produrranno possibilmente i consigli irrigui per i campi segnalati da Agrisfera. Al momento non sono certi i finanziamenti che coprano la manutenzione della rete, del database e la ri-emissione dei consigli irrigui.

Si valuta che per il mantenimento del servizio attuale debba essere reperito un finanziamento di circa 50'000 €/anno. In questo costo, oltre alla manutenzione della rete esistente, può essere prevista la installazione di un paio di nodi per migliorare la qualità del servizio. Se questo finanziamento è reperito per almeno due anni è possibile prevedere l'upgrade del consiglio perché possano essere serviti fino a un centinaio di campi, esclusa la installazione dei nodi necessari e la predisposizione dei dati per ogni singolo campo.



Attualmente stiamo predisponendo una richiesta in ambito regionale e ci attiveremo per estendere il servizio reso.

## 6.5. CONCLUSIONI

Le due reti di sensori (Mandriole e Carrizales) hanno dimostrato di svolgere un buon servizio (copertura media dei rilievi intorno al 90% del possibile). Si sono evidenziati i problemi dell'hardware sia riguardo alla trasmissione fra i nodi che alla affidabilità dei sensori; le prossime installazioni ne trarranno beneficio.

Il portale trasferisce all'utilizzatore le informazioni attinenti la coltura praticata nell'appezzamento con efficacia ed è in grado di emettere per l'utilizzatore il consiglio irriguo unitamente ad una sintetica descrizione della situazione e di ricevere la sintetica descrizione dell'intervento effettuato.

Il modello AquaCrop, utilizzato dal sistema di supporto alle decisioni, si è dimostrato idoneo a rappresentare sia la salinità dei suoli sia la resa della coltivazione. Per un utilizzo automatizzato, occorre peraltro implementarlo con una gestione automatizzata dei flussi di informazione in ingresso e in uscita implementando anche un criterio che non si basi solo sulle condizioni idriche del momento, ma anche sulle previsioni meteo a breve termine e sulla presumibile qualità dell'acqua di irrigazione al momento dell'intervento.

## 7. BIBLIOGRAFIA

### REFERENCES

- Adams JT (2006) An introduction to IEEE STD 802.15.4. Proceedings of 2006 IEEE Aerospace Conference, vol. 8, Big 4-11 March. Sky, Montana, USA, doi: 10.1109/ AERO.2006.1655947
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N. 56. Roma, Italia.
- Amorosi A. (Ed.) (1999). Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, foglio 223-Ravenna ([http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note\\_illustrative/223\\_Ravenna.pdf](http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/note_illustrative/223_Ravenna.pdf)).
- Amorosi A. & Marchi N. (1999). High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the southeastern Po Plain. *Sedimentary Geology*, 128(1-2), 67–81.
- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D. (1999). Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46(1), 99–121.
- Aquater (1988). Modello matematico della falda freatica della Pineta di San Vitale.
- Arpae Emilia-Romagna (2016). Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2012. Erosione e interventi di difesa. I quaderni di Arpae, Bologna, Italia.
- Ayers R.S. and Westcot D.W. (1985). Water quality for agriculture. FAO publication n. 29, Rome, pp.192.
- Bondesan M., Calderoni G., Dal Cin R. (1978). Il litorale delle province di Ferrara e di Ravenna (alto Adriatico); evoluzione morfologica e distribuzione dei sedimenti. *Bollettino della Società Geologica Italiana*, 97(3), 247–287.
- Bonzi L., Calabrese L., Severi P., Vincenzi V. (2010). L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 39, 21–34.
- Bouwer H. & Rice R.C. (1976). A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12(3), 423–428.
- Campo B., Amorosi A., Vaiani S.C. (2017). Sequence stratigraphy and late Quaternary paleoenvironmental evolution of the Northern Adriatic coastal plain (Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 466, 265–278.
- Ciabatti M., Curzi P.V., Rabbi E., Ricci Lucchi M. (2006). Caratteri ambientali ed evolutivi della Valle Smarlacca (Valli di Comacchio, Italy). *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 22, 31–38.

Cipolla S. S., Maglionico M., Masina M., Lamberti A., Daprà I., 2019 - Real time monitoring of water quality in an agricultural area with salinity problems. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(10): 2229-2240.

Conti F, Manzi A, Pedrotti F (1992) Libro rosso delle Piante d'Italia. Ministero Ambiente, WWF Italia, Società Botanica Italiana, Roma.

Correggiari A., Remia A., Calabrese L., Luciani P., Perini L. (2014). High resolution shallow water seismic: a tool to better address coastal planning. Proceedings of the 2014 Ocean Sciences Meeting, Honolulu, Hawaii, USA, 23-28 Feb 2014.

Cristofanelli P. et al. (2019). Continuous observations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in Italy by four permanent observatories. Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-16843, EGU General Assembly 2019.

Dandelot S, Matheron R, Petit Jle, Verlaque R, Cazaubon A (2005) Variations temporelles des parametres physiocochimiques et microbiologiques de trois ecosystèmes aquatiques (Sud-Est de la France) envahis par des *Ludwigia*. C. R. Biologies, 328: 991-999.

Fabbri A. & Trincardi F. (Ed.) (2001). Carta Geologica dei Mari Italiani alla scala 1:250.000: Foglio NL 33-10 Ravenna.

FAO (2014) FAO World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps

FAO (2017). AquaCrop training handbooks. Book I. Understanding AquaCrop. Roma, Italia.

FAO (2018a). Chapter 1. FAO crop-water productivity model to simulate yield response to water. AquaCrop Version 6.0 - 6.1. Reference manual. Roma, Italia.

FAO (2018b). Chapter 3. Calculation procedures. AquaCrop Version 6.0 - 6.1. Reference manual. Roma, Italia.

FAO (2018c). Annexes. AquaCrop Version 6.0 - 6.1. Reference manual. Roma, Italia.

Foster T. , Brozović N., Butler A.P., Neale C.M.U., Raes D., Steduto P., Fereres E., Hsiao T.C., 2017. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181:18-22.

Idroser (1995). Aggiornamento e integrazione del "Piano progettuale per la difesa della costa adriatica emiliano-romagnola". Attività di seconda fase. Relazione generale. Regione Emilia-Romagna, Bologna, Italia.

Lamberti A., Masina M., Lambertini A., Borgatti L. (2018). La contaminazione salina nella fascia costiera tra i fiumi Reno e Lamone: l'influenza delle condizioni geomorfologiche per l'ingressione di acqua marina. Atti del XXXVI Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, IDRA 2018, Ancona, Italia, 12-14 Settembre 2018, paper 317.

Lambertini C, Zanni F, Ferroni L, Speranza M (2020) Monitoring project impact on the natural and semi-natural habitats, plant communities and water quality. Subaction C.2.1. LIFE Agrowetlands II Scientific report.

Lazzari G, Merloni N, Saiani D (2010) Flora Pinete storiche di Ravenna - San Vitale, Classe, Cervia. Parco Delta del Po. Regione Emilia-Romagna.

Masina M., Calone R., Barbanti L., Mazzotti C., Lamberti A., Speranza M. (2019). Smart water and soil-salinity management in agro-wetlands. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(10), 2273-2285.

Masina M., Lamberti A., Speranza M. (2020). Irrigazione smart per i suoli salini. *Terra e Vita*, 16, 48-50, Edizioni Edagricole.

Masina M., Lamberti A., Speranza M., 2020 - Irrigazione smart per suoli salini. *Terra e Vita*, 16: 48-50.

<https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-irrigazione/irrigazione-smart-per-i-suoli-salini/>

Masina M., Lambertini A., Daprà I., Mandanici E., Lamberti A. (2020). Remote Sensing Analysis of Surface Temperature from Heterogeneous Data in a Maize Field and Related Water Stress. *Remote Sensing*, 12(15), 2506, doi:10.3390/rs12152506.

Merloni N, Piccoli F (2001) La vegetazione del complesso Punta Alberete e Valle Mandriole (Parco Regionale del Delta del Po - Italia). *Braun-Blanquetia* 29: 1-17.

Merloni N, Piccoli F (2007) Comunità vegetali rare e minacciate delle stazioni ravennati del Parco del Delta del Po (Regione Emilia-Romagna). *Fitosociologia* 44: 67-76

Metzer MJ, Bunce RGH, Jongman RHG, Múcher CA, Watkins JW (2005) A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 14: 549–563

Patrignani A., Ochsner T. E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107, 2312-2320.

Pioneer (2017). *Vademecum* 2018.

Raes D., Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447.



Regione Emilia Romagna Ambiente (aggiornamento 2012) Siti Natura 2000 della provincia di Ravenna  
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/rete-natura-2000/siti/siti-per-provincia/ravenna>  
Regione Emilia Romagna Direzione Agricoltura (2018) SIC/ZPS IT4070001 Ponte Alberete, Valle Mandriole.  
Quadro conoscitivo <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/rete-natura-2000/siti/it4070001>

Regione Emilia-Romagna. Carta dei suoli dell'Emilia-Romagna  
<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/suoli>.

Rhoades JD, Kandiah A, Mashali AM (1992) Use of saline waters for crop production (FAO Irrigation and Drainage Paper 48). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Šajna N, Kaligarič M, Ivajnšič D (2014) Reproduction Biology of an Alien Invasive Plant: A Case of Drought-Tolerant *Aster squamatus* on the Northern Adriatic Seacoast, Slovenia. In: Rannow S., Neubert M. (eds) Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change. Advances in Global Change Research, vol 58. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960-0_19)

Saxton K. E., Rawls W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Science Society of America Journal, 70, 1569-1578.

Soil Taxonomy (2014) Keys to Soil Taxonomy. By Soil Survey Staff, United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service. Twelfth Edition

Speranza M, Tavelli E, Mazzotti C, Pietrobon P, Lamberti A (2020) Reti wireless di sensori in agricoltura. *Ecoscienza* 2: 32-34

Steduto P., Hsiao T. C., Fereres E., Raes D. (2012). Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N. 66. Roma, Italia.

Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., Fereres E. (2009). AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437.

Unesco (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in marine science 44. Unesco/SCOR/ICES/IAPSO Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards and SCOR Working Group 51.

Vittori Antisari L, Speranza, Ferronato C, De Feudis M, Vianello G, Falsone G (2020) Assessment of Water Quality and Soil Salinity in the Agricultural Coastal Plain (Ravenna, North Italy). *Minerals*, 10, 369.



#### PROJECT COORDINATOR



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

#### PROJECT PARTNERS



#### COLLABORATORS FOR REPLICABILITY IN SPAIN



[www.lifeagrowetlands2.eu](http://www.lifeagrowetlands2.eu)