



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SASSARI**

**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA  
Scienze e Biotecnologie  
dei Sistemi Agrari e Forestali  
e delle Produzioni Alimentari**



Indirizzo: Produttività delle Piante coltivate

*Ciclo XXV*

Variabilità spaziale e temporale di parametri applicati alla  
*Precision Farming* in risicoltura

dr. Francesco Barracu

*Direttore della Scuola*  
*Referente di Indirizzo*  
*Docente Guida*

*Prof. Alba Pusino*  
*Prof. Rosella Motzo*  
*Prof. Antonino Spanu*

*Anno accademico 2011- 2012*



# INDICE GENERALE

1	Abstract.....	3
1.1	Keywords.....	3
2	Introduzione.....	4
3	Variabilità.....	6
3.1	Variabilità spaziale.....	7
3.2	Variabilità temporale.....	8
3.3	Scala della variabilità.....	9
4	Strumenti per la quantificazione della variabilità.....	10
4.1	Informazione storica.....	10
4.2	Telerilevamento.....	11
4.2.1	Definizione e principi.....	11
4.2.2	Piattaforme.....	13
4.2.2.1	Telerilevamento satellitare.....	14
4.2.2.2	Telerilevamento aereo.....	14
4.2.2.3	Radiometri portatili.....	15
4.2.2.4	Sensoristica in movimento.....	16
4.2.3	Esempi e applicazioni.....	17
4.2.4	Indici di vegetazione.....	20
4.3	Tomografia.....	21
4.3.1	Principi.....	22
4.3.2	Esempi e applicazioni.....	23
4.4	Mappa di produzione.....	24
4.4.1	Definizione e principi.....	25
4.4.2	Esempi ed applicazioni.....	26
4.5	Prescrizioni e mappe previsionali.....	28
4.5.1	Supporto decisionale.....	29
4.6	Ipotesi ed Obiettivi.....	31
5	Materiali e metodi.....	32
5.1	Area di studio.....	32
5.2	Tecnica Colturale.....	34
5.3	Determinazioni e rilievi.....	37
5.4	Misure spettrali rilevate in campo.....	40
5.5	Immagini Satellitari.....	42
5.6	Analisi di correlazione.....	43
5.7	Tomografia.....	44
5.8	Zonazione.....	44
6	Risultati e discussione.....	46
6.1	Andamento meteorologico.....	46
6.2	Produzione.....	48
6.2.1	Campionamenti manuali del 2010.....	48
6.2.2	Campionamenti manuali del 2011.....	52
6.3	Contenuto e stima dell'Azoto.....	58
6.4	Radiometria in campo.....	61
6.4.1	Indici spettrali e indice di accostamento.....	61
6.4.2	Indici spettrali e il contenuto in Azoto nella granella.....	63
6.4.3	Indici spettrali e il contenuto in Azoto nella pianta.....	64
6.4.4	Indici spettrali e parametri vegetazionali.....	67
6.4.5	Indici spettrali e LAI.....	71

6.5 Caratterizzazione delle bande pure.....	79
6.6 Telerilevamento satellitare.....	82
6.7 Mappatura delle produzioni.....	86
6.8 Tomografia.....	87
6.9 Analisi di correlazione.....	90
6.10 Zonazione.....	96
7 Conclusioni.....	99
8 Bibliografia.....	101
9 Appendice.....	<i>I</i>
9.1 Schede varietali.....	<i>I</i>
9.2 Mappe.....	<i>VIII</i>



# 1 ABSTRACT

Measuring plant biophysical parameters at the field scale can be expensive and time consuming as large amount of sample points and measurements to estimate spatial and temporal variability are necessary. Vegetation indices from remote and proximal sensing could be used to estimate variables linked to canopy properties. Particularly, vegetation indices (VI) from remote sensing provide spatio-temporal information on the entire field canopy variability, overcoming the limitations of sampling field investigation. The development of dedicated algorithms makes the spectral indices computation analysis rather quick. Nowadays, the development of vegetation indices and their application is one of the most important topics in precision agriculture.

The objective of this research was to assess the spatial variability of Leaf Area Index (LAI) and plant nitrogen content in paddy rice through remote and proximal sensing imagery analysis in Sardinia. In 2010 and 2011 field measurements of LAI, chlorophyll content and Nitrogen canopy content were taken at 36 sample point locations. At the same points spectral canopy signature was measured with a portable hyperspectral radiometer (ASD, FieldSpec) and a time series of satellite images from RapidEye. Various vegetation indices were adopted to estimate LAI and N plant content.

## 1.1 KEYWORDS

Precision Farming, Vegetation Index, LAI, Rice, Site-specific management.

## 2 INTRODUZIONE

L'Agricoltura di Precisione o *Precision Farming* rappresenta ad oggi una delle frontiere più avanzate per quanto concerne le produzioni agricole in scala di campo, ed è largamente riconosciuta come contributo chiave nella tecnologia produttiva. È una metodologia che si prefigge di sfruttare tutte le possibilità offerte dalla tecnologia attualmente disponibile per fornire alla coltura gli *inputs* produttivi in maniera razionale, calcolati in base alle reali esigenze della coltura in funzione della reale variabilità spaziale e temporale misurata in campo.

Pierce e Nowak (1999) hanno definito la *Precision Farming* come “l'applicazione di tecnologie e principi per la gestione della variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola con l'obiettivo di migliorarne le potenzialità rispettando la qualità dell'ambiente”. Questa definizione coglie appieno i due aspetti fondamentali della *Precision Farming*: l'esigenza di definire la variabilità spaziale e temporale connessa con le attività agricole e la necessità di migliorare le produzioni gestendo gli interventi senza sprechi, nel rispetto dell'ambiente (Basso *et al.*, 2005).

I sistemi di produzione agricoli hanno beneficiato dell'impiego di tecnologie originariamente sviluppate per altri settori produttivi. L'era industriale ha portato la meccanizzazione e la possibilità di ottenere prodotti di sintesi; l'era tecnologica ha messo a disposizione l'ingegneria genetica e l'automazione; l'era informatica ha fornito il potenziale per poter integrare i progressi tecnologici nella *Precision Farming* (Whelan *et al.*, 1997 in Zhang N. *et al.*, 2002). Le tecnologie oggi disponibili offrono la possibilità di effettuare stime e valutazioni sulla produttività delle colture con un approccio completamente nuovo (Basso *et al.*, 2001; 2007).

Il principio fondamentale sulla quale si basa la *Precision Farming* è essenzialmente “*do the right thing, at the right time, in the right place*” a cui bisognerebbe aggiungere “*in the right way, in the right amount*”. Questo principio nasce dalla consapevolezza che in agricoltura, così come in qualsiasi ambito di studio di sistemi biologici complessi, insistono una grande quantità di variabili che influenzano in maniera più o meno importante il risultato finale. Tutte le attività connesse con le produzioni agricole

hanno una loro importanza per il corretto svolgimento del ciclo biologico delle piante coltivate, e l'uomo ha imparato ad agire sull'ambiente agrario in modo da modificare le condizioni di crescita delle colture per cercare di ottenere una resa sempre più elevata in termini quantitativi e qualitativi.

Con la *Precision Farming*, sfruttando al massimo tutte le potenzialità offerte dalla tecnologia moderna, si intende agire nella maniera più razionale possibile su tutte le principali variabili controllabili da parte dell'uomo per ottenere i migliori risultati utilizzando meno *inputs* possibili. La distribuzione corretta dei fattori di produzione e delle lavorazioni agrarie devono però essere elaborate sulla base di una precisa pianificazione degli interventi, che presuppongono una profonda conoscenza delle proprietà del campo ed una intensa attività di indagine.

Gli obiettivi che si intende perseguire attraverso l'impiego delle tecniche di *Precision Farming* sono molteplici, e possono essere classificati da un punto di vista economico-finanziario, ambientale e produttivo. Attraverso lo studio della variabilità spaziale e temporale dei fattori produttivi naturalmente presenti in campo, e tenendo in considerazione le eventuali interazioni tra gli stessi, è possibile cercare di stabilire con buona approssimazione le esigenze che la coltura manifesterà durante il ciclo colturale, e gli interventi necessari a garantire un omogeneo sviluppo della pianta sopperendo alle eventuali specifiche carenze dell'area.

Lo studio della variabilità, sia essa spaziale che temporale, presuppone una serie di indagini che mettano in evidenza le principali differenze tra due unità di terreno all'interno del campo, e le modificazioni che il suolo subisce durante il ciclo colturale. Le variabili che devono essere prese in considerazione saranno stabilite in funzione della coltura in atto e della loro incidenza sullo sviluppo della pianta, secondo il principio del fattore più limitante. In secondo luogo, poichè la determinazione di molte variabili agronomiche è indubbiamente molto costosa in termini di tempo e di lavoro, è auspicabile l'impiego di metodologie e strumentazioni tecnologicamente avanzate che rendano più rapido il lavoro e consentano di effettuare una serie di valutazioni e di stime che sarebbe tecnicamente impossibile fare in maniera tradizionale.

Si è fatto ampio ricorso alla spettrometria per stimare molti dei parametri fisiologici e strutturali della pianta, allo scopo di verificare la risposta vegetativa alle condizioni di campo. Questa metodologia permette di isolare geograficamente le aree omogenee che offrono *performances* differenti in cui svolgere rilievi più approfonditi o agire agronomicamente per aumentare la produttività della coltura (*site-specific management*).

### 3 VARIABILITÀ

La pratica dell'agricoltura in scala di campo richiede necessariamente lo svolgimento di attività preparatorie su ampie superfici e la distribuzione di altri *inputs* di produzione durante il ciclo colturale. Normalmente tutte le operazioni connesse con l'agricoltura vengono svolte in maniera omogenea per unità di superficie, dove la più piccola unità considerata è l'appezzamento. Questo approccio è giustificato da due aspetti strettamente tecnici. Innanzi tutto, non sempre risulta immediata una valutazione affidabile della variabilità di campo, e allo stesso tempo non sono ancora abbastanza diffuse le attrezzature e le macchine operatrici che possano variare in maniera rapida ed efficace la loro intensità di lavoro. Per questo motivo, è praticamente più semplice e più veloce considerare tutto l'appezzamento come un continuum omogeneo e apportare tutti gli *inputs* produttivi in maniera indifferenziata (Stafford, 2000). La *Precision Farming*, invece, presuppone la possibilità di ridurre drasticamente la scala di valutazione e di intervento attraverso l'utilizzo di strumentazioni ad alto contenuto tecnologico. La variabilità del campo e dei parametri fisiologici della coltura è la norma piuttosto che l'eccezione (Pierce and Nowak, 1999) ed è dunque fondamentale lo studio sistematico della variabilità all'interno del singolo appezzamento, o nel caso limite di colture arboree addirittura per ciascuna singola pianta, per valutare caso per caso quali siano gli interventi da intraprendere ed in quale intensità. Poiché le esigenze della coltura variano in funzione della fase fenologica e dall'accrescimento raggiunto, e le condizioni dell'ambiente agrario possono variare durante il ciclo colturale, è opportuno fare una distinzione fra la variabilità spaziale e la variabilità temporale. Infine, rispetto ad ogni variabile ritenuta influente nella

gestione della coltura, viene stabilita una classificazione dei valori ed ad ogni area omogenea sarà assegnata una sigla che esprime la caratterizzazione spaziale e temporale: S H (Valore stabilmente elevato); S L (valore stabilmente basso); U H (valore eccezionalmente elevato); U L (valore eccezionalmente basso).

### 3.1 VARIABILITÀ SPAZIALE

All'interno di un campo coltivato, per quanto omogeneo, esiste sempre una variabilità più o meno importante. La presenza di un drenaggio, un frangivento, o la pendenza possono essere considerati potenziali sorgenti di variabilità. Ancora più importante è la variabilità insita nelle caratteristiche intrinseche dei suoli, quali la tessitura, la profondità degli orizzonti o la composizione chimica. Tra tutti i parametri variabili osservabili in campo è opportuno operare una distinzione tra quelli che possono essere modificati in maniera relativamente semplice, quali la disponibilità di micro e macroelementi, e quelli che invece non possono essere modificati direttamente, ma che devono comunque essere considerati per ovviare per via indiretta ai loro effetti sulla coltura. Lo studio della variabilità spaziale è di fondamentale importanza e deve essere svolto preliminarmente alla pianificazione di ogni attività.

Accanto alla variabilità spaziale delle condizioni di campo, può essere condotto lo studio della variabilità spaziale delle principali caratteristiche vegetative della coltura, studiando i comportamenti della pianta nelle diverse aree omogenee. La variabilità spaziale delle caratteristiche della coltura (produzione, qualità del prodotto, sviluppo e accrescimento della pianta) generalmente trova una spiegazione diretta nelle caratteristiche ambientali nella quale essa insiste, e in questo caso è facile capire quali siano i fattori che si configurano come “limitanti” nei confronti della coltura; esistono però dei casi in cui la variabilità spaziale dell'ambiente e la variabilità spaziale della coltura non corrispondono, in termini di distribuzione delle aree considerabili omogenee o di entità della variabilità. Anche se spesso di difficile interpretazione, questi sono i casi in cui, attraverso lo studio della variabilità, è possibile identificare e

isolare fattori non considerati a priori, e pianificare interventi opportuni a modificarli o a mitigarne gli effetti.

### 3.2 VARIABILITÀ TEMPORALE

Un aspetto importante della variabilità di campo è il comportamento della stessa unità di suolo in momenti diversi. Nel momento in cui viene delimitata una zona omogenea rispetto ad una variabile data, è opportuno stabilire se le caratteristiche misurate si mantengono costanti nel tempo o subiscono delle variazioni; in seconda istanza, è necessario stabilire l'arco temporale all'interno del quale queste variazioni si verificano. Durante le campagne di indagine si riscontreranno alcune caratteristiche che possono presentare forti variazioni sia su scala annuale (contenuto in N) che stagionale o addirittura giornaliera (contenuto idrico del suolo). D'altra parte è necessario tenere in opportuna considerazione il fatto che alcune di queste variabili presentano un andamento ciclico, che, pur variando nel corso dell'anno, mostrano un comportamento del tutto simile da un anno all'altro.

La variabilità temporale dell'ambiente agrario è legata alla velocità con cui si verificano i processi fisici chimici e biologici che agiscono sui suoli e sull'induzione di nuove fonti di variabilità di tipo antropico. Poiché la variabilità dei fattori ambientali non ha necessariamente la stessa scala della variabilità temporale della coltura, accanto alla quantificazione delle variazioni nel tempo del campo coltivato, è opportuno studiare l'evoluzione delle colture in atto, per programmare razionalmente gli interventi di cui la pianta ha bisogno o per scegliere in maniera più opportuna il momento migliore in cui intervenire.

Durante la stagione vegetativa, la coltura stessa può essere utilizzata come indicatore di alcuni parametri legati alle caratteristiche del suolo, cercando di interpretare i segnali sintomatici che si manifestano negli aspetti morfologici della pianta.

### 3.3 SCALA DELLA VARIABILITÀ.

Una caratteristica non trascurabile della variabilità spaziale e temporale è la scala nella quale si verifica e alla quale i suoi effetti diventano evidenti. Analizzando un territorio a partire da una visione generale fino al particolare, dovranno essere tenuti in considerazione aspetti diversi, ognuno dei quali potenzialmente influenti sul risultato della coltura. In termini generali potremmo osservare che su scala territoriale gli aspetti principali riguarderanno la conformazione morfologica, geologica e pedologica dell'area; a scala di campo saremmo molto più interessati alla disponibilità dell'acqua, alla composizione chimica dei suoli, alla disponibilità di macro e microelementi; in scala di appezzamento, diventa importante anche la presenza di un frangivento, di essenze infestanti, la distanza delle aree di saggio di riferimento rispetto al bordo dell'appezzamento; su scala di singola pianta, piccole variazioni nella profondità della lama d'acqua di sommersione porterà determinati effetti, così come, nell'arco di pochi millimetri sarà profondamente diversa la speciazione chimica legata allo stato ossidativo degli elementi necessari allo sviluppo della coltura.

Ognuna delle variabili agronomicamente controllabili ha una sua scala di riferimento, dovuta ad una componente deterministica (la composizione del suolo dipenderà in larga parte dalla sua origine pedologica) e ad una stocastica (distribuzione non omogenea di una concimazione). Quando la variabilità presenta un'origine di tipo esclusivamente stocastico si ha una distribuzione casuale nello spazio dei valori della variabile considerata; quando l'origine è puramente deterministica, è possibile riconoscere una distribuzione ordinata e orientata nello spazio dei valori. In natura è piuttosto improbabile che si verifichino queste condizioni; parte importante dello studio della variabilità è la comprensione dei motivi che originano la variabilità e la scala spaziale e temporale di variazione. Da questo punto di vista si definisce la variabilità a lungo o a breve raggio, che deve essere confrontata con il raggio di azione delle strumentazioni utilizzate nell'indagine della variabilità e delle attrezzature agricole a disposizione nell'ordinaria gestione dell'appezzamento, che influiscono sugli interventi di mitigazione degli effetti.

## 4 STRUMENTI PER LA QUANTIFICAZIONE DELLA VARIABILITÀ

Le fonti di variabilità spaziale e temporale possono essere le più varie, e possono trovare origine in un numero spesso non controllabile di fattori. A scala di campo, inoltre, molte variabili non possono essere controllate, poichè dipendono da scale maggiori o perchè sono rappresentate da caratteristiche non facilmente modificabili da parte dell'uomo. È comunque necessario cercare di avere una conoscenza più ampia possibile della situazione iniziale, quantificare la variabilità, gli effetti che essa comporta, e determinarne la scala.

### 4.1 INFORMAZIONE STORICA

L'acquisizione di serie storiche, anche senza un rigore strettamente scientifico, è uno dei primi e principali metodi per la quantificazione della variabilità spaziale e temporale. Conoscere le produzioni di un'area durante una serie di anni, a parità di condizioni, può essere un'informazione sufficiente per stimare la produzione attesa. Attraverso la ripetizione della stessa coltura risulta relativamente semplice individuare le aree che raggiungono produzioni maggiori o minori, e spesso permettono di ipotizzarne le cause più probabili. In termini di agricoltura di precisione, l'acquisizione di serie storiche di dati consente:

A) di effettuare una stima della variabilità temporale delle variabili spaziali tanto più accurata quanto più è lunga la serie a disposizione;

B) di quantificare quanto le eventuali aree omogenee siano stabili nel tempo o se a loro volta anch'esse subiscano delle modificazioni.

Il confronto di informazioni poliennali, oltre a offrire un valido supporto nella stima di una variabile, può essere decisiva nel fornire elementi utili alla comprensione del fenomeno che causa una determinata dinamica.



## 4.2 TELERILEVAMENTO

Il telerilevamento rappresenta una delle tecniche di misura che possono essere impiegate nella quantificazione della variabilità e nella valutazione dello stato di una coltura. Tecnicamente il telerilevamento non è altro che l'insieme delle metodologie finalizzate alla determinazione del valore di una variabile senza necessariamente entrare in contatto fisico con essa.

Le prime applicazioni di telerilevamento sono ovviamente connesse con la frazione visibile dello spettro elettromagnetico, attraverso l'acquisizione di informazioni diagnostiche sulla coltura attraverso la vista. Nonostante già nella Grecia classica fossero note a grandi linee le principali caratteristiche della radiazione elettromagnetica visibile e i fondamentali delle proprietà di rifrazione e riflessione, le prime applicazioni scientifiche di telerilevamento risalgono al 1800 con la scoperta dell'esistenza di uno spettro elettromagnetico oltre il visibile, ad opera di William Herschel. Da quel momento è iniziato lo studio sistematico delle regioni sconosciute dello spettro, dell'elettromagnetismo e delle dinamiche di emissione dello spettro elettromagnetico, ma soprattutto delle sue connessioni con aspetti fisici quali la composizione chimica degli oggetti e la temperatura.

### 4.2.1 DEFINIZIONE E PRINCIPI

Il telerilevamento consente di acquisire informazioni qualitative o quantitative sulle caratteristiche di qualunque corpo emetta, assorba o rifletta onde elettromagnetiche in intervalli specifici dello spettro. Qualsiasi oggetto abbia una temperatura superiore allo 0 assoluto (0°K, -273.15 °C) ha una sua emissione elettromagnetica caratteristica, che varia di intensità in funzione dell'energia posseduta dal corpo. Quando un corpo viene investito da una fonte di energia esterna (nel caso specifico di energia radiante) tutta la radiazione incidente subirà delle modificazioni, che dipendono dalla composizione e dallo stato fisico del corpo e del mezzo nella quale esso è immerso.

Parte dell'energia incidente viene assorbita, e di questa una parte viene trattenuta dal corpo, interagisce con la sua struttura e viene riemessa a una diversa lunghezza d'onda,

generalmente maggiore; una parte, in funzione delle caratteristiche di opacità del corpo può essere rifratta, per cui l'onda elettromagnetica subisce delle modificazioni in termini di direzione, ma non necessariamente di intensità; una parte, infine, colpita la superficie del corpo non interagisce con esso, e viene riflessa. La composizione della radiazione riflessa è la caratteristica che ci permette di cogliere i colori visibili. È noto che la vista dell'occhio umano è legata alla capacità di ricevere ed interpretare la radiazione luminosa visibile riflessa dagli oggetti; il telerilevamento sostituisce all'occhio umano degli appositi sensori che consentano di cogliere non soltanto le bande visibili, ma di cogliere informazioni utili anche da porzioni dello spettro verso le quali il corpo umano non è sensibile.

Le porzioni di spettro elettromagnetico emesse o riflesse dagli oggetti possono fornire indicazioni fondamentali sulla loro composizione, sulla loro capacità di assorbire determinate lunghezze d'onda e rifletterne altre, sul loro stato termico. Poiché oggetti di composizione simile tendono ad avere bande di assorbanza e riflettanza simili, il telerilevamento per via spettrale può essere un utile strumento per studiare le differenze anche fra oggetti simili, ad esempio, gruppi di piante.

Da un punto di vista pratico, attraverso il telerilevamento è possibile acquisire lo spettro emesso e riflesso dalla superficie terrestre in forma grafica o numerica. Dalla composizione delle specifiche bande (o lunghezze d'onda) è possibile determinare quale sia la tipologia di corpo che possiede la stessa tipologia di spettro. Le bande caratteristiche di riflettanza dei corpi possono essere anche molto diverse tra loro e il telerilevamento consente di discriminare in maniera relativamente semplice oggetti di origine diversa.

Poiché la radiazione elettromagnetica ha generalmente una buona capacità di attraversare l'aria (e l'atmosfera), in funzione della distanza tra il sensore e l'oggetto misurato si definiscono due tipologie di telerilevamento:

A) il *Remote Sensing*, nel quale l'acquisizione del dato spettrale è effettuata a grande distanza dalla superficie della coltura;

B) *Proximal Sensing*, nel quale, nonostante il sensore non entri in contatto fisico con la pianta, è necessario entrare in campo per effettuare la misura.

Esistono sistemi di misura dello spettro di tipo passivo, in cui la misura avviene per differenza tra le lunghezze d'onda incidenti provenienti dal Sole e lo spettro riflesso o emesso dalla coltura, oppure sistemi di tipo attivo che emettono una propria sorgente di radiazione e misurano la frazione che non viene assorbita.

#### 4.2.2 PIATTAFORME

La tecnologia moderna ha messo a disposizione una grande varietà di strumentazioni per la misura spettrale, classificabili in funzione delle specifiche condizioni di lavoro:

- dalla scala di misura, o risoluzione spaziale (da pochi millimetri a diversi chilometri);
- dalla distanza del sensore dall'oggetto di misura (da pochi millimetri a centinaia di chilometri);
- dalla risoluzione spettrale, cioè dalla sensibilità del sensore nel discriminare la radiazione ricevuta per singole bande, multipli o sottomultipli;
- fonte primaria di radiazione (sistemi attivi o passivi).

In campo agrario sono disponibili diverse soluzioni per la diagnosi e lo studio delle coltivazioni per via spettrale e ciascuna di esse ha i suoi vantaggi e svantaggi; è necessario operare una scelta ragionata sulla base del risultato che si vuole ottenere. Diverse tipologie di strumentazioni comportano differenti modalità di analisi e interpretazione del dato, e questo è un aspetto che deve essere tenuto in considerazione al momento di pianificare un rilievo di tipo elettromagnetico.

#### 4.2.2.1 TELERILEVAMENTO SATELLITARE

Nel corso degli ultimi anni sono state lanciate in orbita diverse costellazioni di satelliti dotati di sensori spettrali, per gli usi più diversi: meteorologia, pianificazione territoriale, a scopi militari, scientifici e cartografici. Tutti i sistemi di telerilevamento satellitare sono di tipo passivo e rientrano nel gruppo delle strumentazioni *Remote Sensing*. Possono essere equipaggiati con sensori di tipo pancromatico (tutte le lunghezze d'onda raggruppate in una sola banda) o multispettrale (le lunghezze d'onda sono memorizzate singolarmente o per gruppi relativamente ristretti). Ognuno dei satelliti oggi disponibili è equipaggiato con sensori differenti in termini di caratteristiche tecniche: risoluzione spaziale, risoluzione spettrale e intervallo di bande rilevabili. Un'altra differenza di non secondaria importanza è la sincronia dei passaggi dei satelliti con la posizione del Sole, che influenza la quantità di radiazione incidente e potenzialmente riflessa dall'oggetto di studio, e la frequenza dei passaggi successivi sulla stessa area.

Il grande vantaggio offerto dal telerilevamento satellitare è la possibilità di ottenere una grande quantità di informazioni su superfici molto ampie simultaneamente, anche di zone altrimenti difficilmente accessibili. Il risultato ottenuto è una mappa in cui il singolo *pixel* non rappresenta semplicemente una cella di colore, ma è associato ad un *database* che contiene le informazioni spettrali per tutte le bande rilevabili dallo specifico sensore e le relative coordinate. Le singole immagini devono poi essere elaborate e corrette per tenere in opportuna considerazione l'angolo con cui sono state acquisite rispetto all'oggetto e le interferenze che la radiazione riflessa subisce nell'attraversare l'atmosfera, anche in considerazione delle condizioni meteorologiche che possano essersi verificate.

#### 4.2.2.2 TELERILEVAMENTO AEREO

L'acquisizione di dati spettrali attraverso l'utilizzo di ortofoto aeree è concettualmente molto simile a quella satellitare. Analogamente alla produzione di ortofoto per fini cartografici, essa è costituita da aerei equipaggiati con sensoristica

pancromatica o multispettrale che registrano i dati elettromagnetici al loro passaggio. Sostituisce il telerilevamento mediante palloni aerostatici. Rientra fra le tecnologie *Remote Sensing* ed è generalmente di tipo passivo. Presenta il grande vantaggio di permettere passaggi a quote variabili, permettendo di regolare la risoluzione spaziale fino al livello desiderato, e di calibrare con precisione la superficie che si vuole analizzare, mentre la risoluzione spettrale dipende dal tipo di sensore utilizzato. L'utilizzo di un mezzo versatile come un aereo permette di organizzare le misure per più passaggi successivi, eseguire più rilievi in successione, ma anche di modificare la sensoristica di bordo in funzione dell'obiettivo previsto.

Essendo relativamente ridotta la distanza tra la superficie analizzata ed il sensore, non sono necessari grandi interventi di pulizia e correzione del dato rilevato, anche se le condizioni meteorologiche possono influenzare l'esito del rilievo più che nel rilievo per via satellitare.

Così come il telerilevamento satellitare, anche il telerilevamento aereo (*Airborne spectral data*) può fornire un *output* sia in formato numerico che grafico, consentendo simultaneamente una analisi di tipo matematico quanto un approccio cartografico.

#### 4.2.2.3 RADIOMETRI PORTATILI

I radiometri portatili sono una fra le più rapide applicazioni di telerilevamento spettrale e possono essere sia di tipo attivo che di tipo passivo. Esiste una grande varietà di radiometri in commercio e sono normalmente utilizzati per le applicazioni più varie: dalla determinazione di misure di tipo chimico in laboratorio, alla determinazione di inquinanti nelle acque, alla composizione geologica delle rocce ecc.

I radiometri utilizzati in campo agricolo possono essere portati a mano o montati su treppiedi, sono versatili e consentono di archiviare una grande quantità di misure in tempi ridotti. Ricadono nel gruppo delle attrezzature di *Proximal Sensing*, poichè la distanza del sensore dalla superficie della coltura può variare nell'ambito dei centimetri e la superficie dell'area misurata varia in funzione di questa distanza.

La caratteristica principale dei radiometri portatili è che forniscono informazioni unicamente di tipo numerico, ma soprattutto di tipo puntuale. L'utilizzo di questa tipologia di strumentazioni consente di scegliere in maniera mirata le popolazioni campione da analizzare, ma allo stesso tempo richiede grande attenzione e un buon grado di esperienza nella determinazione della rappresentatività della misura acquisita.

Essendo la superficie di misura molto ridotta non è infrequente la registrazione di misure poco rappresentative e spesso è necessario acquisire un maggior numero di misure in successione nella stessa area per garantire la correttezza del dato.

#### 4.2.2.4 SENSORISTICA IN MOVIMENTO

L'applicazione della *Precision Farming* in modalità *on the go* è oggi ancora in fase piuttosto embrionale, ma rappresenta una materia di studio con amplissime opportunità. Diversamente dall'elaborazione diretta delle mappe previsionali per la redazione di mappe di prescrizione, la tecnologia *on the go* concilia allo stesso tempo l'acquisizione del dato, la sua elaborazione e una risposta attiva immediata. Risulta applicabile in tutte quelle situazioni in cui la variabile da controllare mostra un sintomo tipico univoco, tale che sia possibile agire in maniera diretta ogniqualvolta il sintomo si presenti senza ulteriori o più approfondite indagini.

Da un punto di vista tecnico le attrezzature e le macchine operatrici devono essere fornite di tre componenti principali: a) un sistema di rilevamento della variabile; b) un sistema di analisi del dato e di programmazione dell'azione da intraprendere; c) un meccanismo attivo di intervento, dotato di sistemi di attivazione, disattivazione, variazione dell'intensità.

Il vantaggio delle tecnologie in movimento è la capacità di rilevare in continuo la variabile interessata, che consente una valutazione complessiva di tutta la variabilità spaziale e la possibilità di eseguire interventi a rateo variabile senza dover necessariamente svolgere analisi preventive nè particolari elaborazioni. L'aspetto negativo è che l'efficacia dell'intervento può essere valutato soltanto a posteriori.

Un esempio tipico è rappresentato dalle irroratrici da diserbo: la trattrice viene equipaggiata con sensori ottici in grado di distinguere la risposta spettrale dell'infestante da quella della coltura; il software, sulla base dell'informazione acquisita dosa la quantità di prodotto da distribuire, stabilisce quale è l'area interessata, e invia alla barra il comando di aprire o chiudere i relativi ugelli. Allo stato attuale, il limite di questa tecnologia è la difficoltà nel trovare soluzioni di misura sufficientemente accurate da garantire un risultato ottimale.

#### 4.2.3 ESEMPI E APPLICAZIONI

Le tecnologie sviluppate per il telerilevamento sono caratterizzate da campi di applicazione amplissimi e trovano impiego in tutti i settori in cui sono oggetto di valutazione elementi dello spazio che mostrano proprietà elettromagnetiche caratteristiche riconoscibili.

Lo studio degli spettri e delle proprietà elettromagnetiche fornisce oggi un supporto informativo non soltanto nel campo dell'agricoltura, ma anche della cartografia fisica, dell'archeologia, della geologia, nella gestione dell'ambiente. L'integrazione di queste discipline ha permesso di mettere a punto strumentazioni molto complete, che sono il risultato di studi effettuati sullo stesso fenomeno da diversi punti di vista. È utile alla comprensione delle potenzialità di questi strumenti non soffermarsi soltanto all'applicazione agricola, ma vedere quali possano essere i potenziali campi di utilizzo per evidenziare settori di studio nuovi e non ancora esplorati.

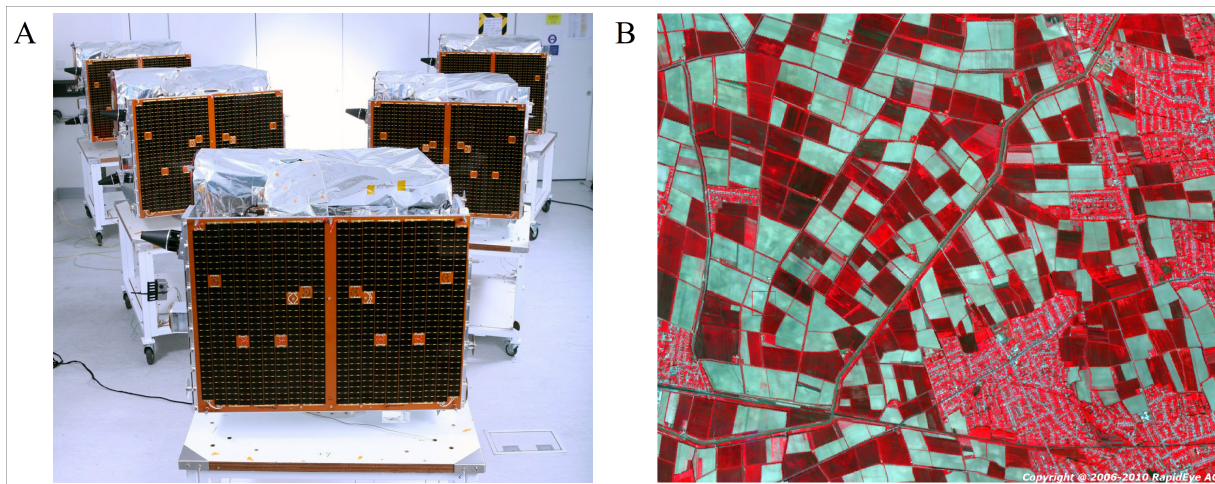


Fig. 1: I cinque satelliti della ditta tedesca RapidEye A.G. prima del loro lancio in orbita (A); Immagine in falsi colori delle aree irrigue della valle di Ferghana (Uzbekistan). Il colore rosso identifica le aree in cui è localizzata della vegetazione (B). (Copyright © 2006-2010 RapidEye AG.)

I rilievi di tipo satellitare (Fig 1A) sono utilizzati ormai da anni in tutti i campi della cartografia tematica, per evidenziare la presenza e l'intensità di determinati fenomeni sulla crosta terrestre. Con l'utilizzo di sensori pancromatici (Fig. 1 B) o multispettrali, è sufficiente focalizzare l'attenzione su bande di riflettanza differenti per poter quantificare e delimitare fenomeni diversi.

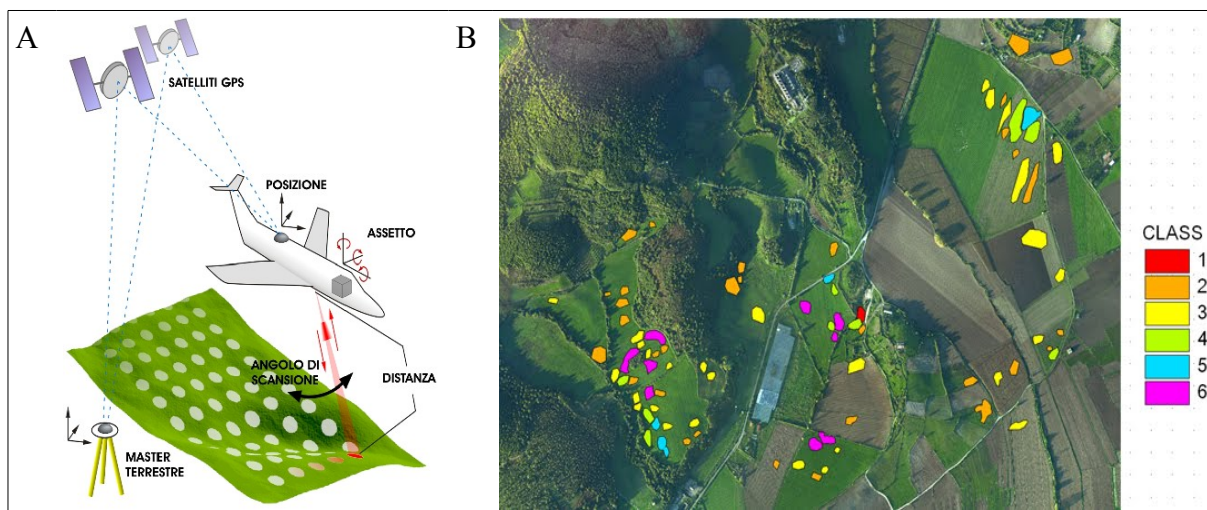
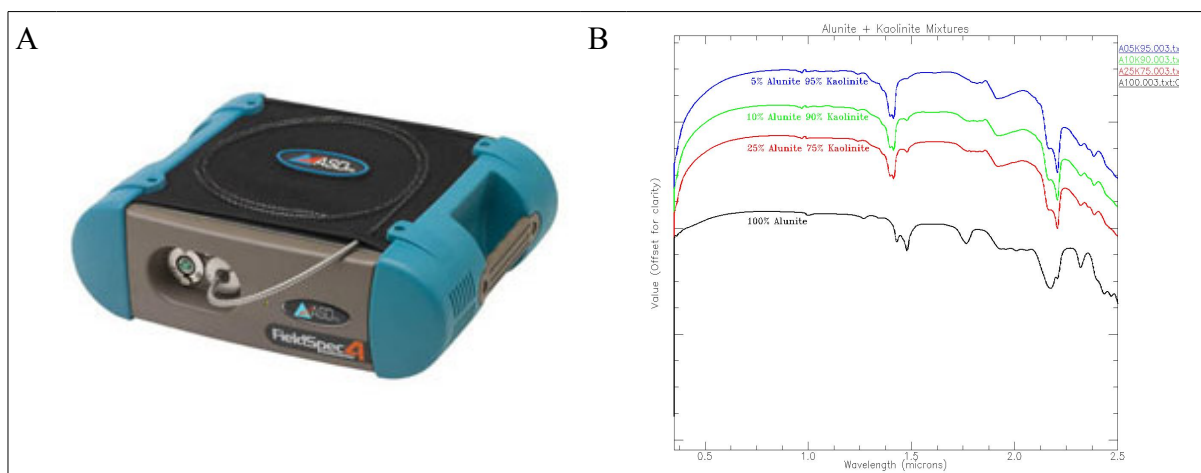


Fig. 2: Schema del sistema di telerilevamento aereo adottato dalla Protezione Civile della Regione autonoma del Friuli Venezia Giulia per la redazione delle carte delle pendenze, per la prevenzione del rischio di erosione e frane erosione (A). Mappa della localizzazione delle caldere di Latera, nel Lazio settentrionale attraverso l'analisi spettrale della concentrazione della  $CO_2$  emessa, 2000-2011 © LSWN - Le Scienze Web (B).



Il telerilevamento risulta molto funzionale non soltanto nella determinazione di caratteristiche intrinseche dei corpi, ma anche nella determinazione della loro posizione nello spazio, con un ottimo livello di precisione (Fig. 2 A). Tecnologie di telerilevamento attive, quali i rilievi cartografici aerei ad impulsi laser permettono di determinare la posizione tridimensionale di un punto annullando l'effetto della vegetazione senza la necessità di alcun rilievo topografico in campo.

Utilizzando bande specifiche è possibile effettuare analisi di sostanze e composti non soltanto allo stato solido, come nel caso del territorio urbano o rurale, ma anche di fluidi allo stato liquido o gassoso, attraverso lo studio delle loro interazioni con lo spazio circostante (Fig. 2 B).



*Fig. 3: ASD Fieldspec portatile (A); Studio delle bande spettrali per la determinazione della composizione geologica di campioni di rocce con diversi contenuti in kaolinite e Alunite (GeoIntegral Ltda., Chile) (B).*

La precisione di alcune strumentazioni spettrali permette di effettuare analisi anche piuttosto complesse nel campo della pedologia e della geologia (Fig. 3 B). La determinazione delle proporzioni di minerali diversi in un suolo può risultare lunga e costosa, oltre che di difficile realizzazione per l'elevato numero di campioni necessari; l'analisi spettrale consente di rendere molto più rapida la stima e di acquisire un gran numero di dati in tempi decisamente ristretti.

#### 4.2.4 INDICI DI VEGETAZIONE

La ricerca scientifica nel campo del telerilevamento spettrale si è focalizzata principalmente sullo studio delle bande di riflettanza e degli indici vegetazionali più opportuni per effettuare la stima della variabile desiderata e sulle strumentazioni più adatte a questo scopo.

Le semplici bande spettrali veicolano una grande quantità di informazioni sullo stato della coltura e delle sue caratteristiche chimiche e morfologiche, ma risultano di difficile interpretazione perchè spesso il rilievo spettrale si traduce in enormi database costituiti da migliaia di valori a seconda dell'ampiezza dello spettro indagato e della risoluzione spettrale scelta. Per rendere più agevole l'interpretazione della radiometria si è fatto ricorso a degli indici calcolati sui rapporti o sulle differenze nell'energia radiante emessa nelle varie lunghezze d'onda, tenendo in opportuna considerazione le particolari bande caratteristiche della pianta.

Gli indici vegetazionali sono basati sui rapporti che intercorrono tra determinate bande spettrali caratteristiche di assorbimento e riflettanza e le caratteristiche vegetative della coltura (Jackson *et al.*, 1991). Diversi studi hanno dimostrato che la banda spettrale denominata red-edge, definita come l'intervallo che contiene la minima riflettanza del rosso e la massima riflettanza del vicino infrarosso, è molto sensibile al contenuto in clorofilla della pianta (Dawson *et al.*, 1998, Cammarano *et al.*, 2011).

Le formulazioni degli indici di vegetazione possono essere anche molto complesse per valutare una maggior quantità di variabili potenzialmente influenti, quali l'effetto *background* del suolo (Bannari *et al.*, 1996; Baret *et al.*, 1989; Huete, 1988; Qi *et al.*, 1994; Rondeaux *et al.*, 1996), o lo stato idrico, la struttura morfologica della pianta, l'effetto distorsivo dell'atmosfera (Karnieli *et al.*, 2001; Kaufman & Tanre, 1992), anche se è impossibile formulare indici capaci di fornire indicazioni sulla variabile di interesse senza subire influenze da tutti gli altri parametri caratteristici della vegetazione o dell'ambiente (Govaerts *et al.*, 1999). Tuttavia, esistono indici considerati più robusti di altri per via della loro minore sensibilità rispetto a parametri esterni rispetto a quelli oggetto di studio (Chen, 1996, Brown *et al.*, 2000, Baret &

Guyot in 1991 and Broge & Leblanc in 2000). Trovano applicazione nella stima del LAI durante il ciclo colturale (Yang and Chen, 2004), delle produzioni (Chen and Yang 2005), del vigore e della quantità di biomassa prodotta (Holben *et al.*, 1980; Leblon *et al.*, 1991; Gilabert *et al.*, 1996) dello stato idrico della pianta (Wooten *et al.*, 1999).

La forma algebrica e le bande impiegate per il calcolo degli indici varia in funzione del tipo di variabile che si intende studiare dagli aspetti fotochimici (Broge & Leblanc, 2000; Chappelle *et al.*, 1992; Daughtry *et al.*, 2000; Gamon *et al.*, 1992; Haboudane *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 1994), a quelli legati alla superficie fogliare sviluppata dalla coltura (Brown *et al.*, 2000; Chen, 1996) o alla biomassa (Gitelson *et al.*, 2001). La principale controindicazione nell'uso di indici spettrali è il fatto che molte delle variabili sono connesse sia ad aspetti strutturali che biochimici della coltura (Goel, 1988; Jacquemoud *et al.*, 2000; Zarco-Tejada *et al.*, 2001), ma recenti studi hanno dimostrato la possibilità di ovviare la problema utilizzando combinazioni di diversi indici (Cammarano et al 2011, Daughtry *et al.*, 2000; Haboudane *et al.*, 2002).

L'utilizzo di indici di vegetazione è frequente e diffuso per l'interpretazione di dati spettrali provenienti da applicazioni di telerilevamento satellitare, areo o in campo attraverso spettrometri portatili, aumentando il grado di confrontabilità tra dati ottenuti con tecnologie e scale di misura molto differenti.

Lo studio della variabilità attraverso l'analisi degli indici spettrali può essere quindi condotta sia a scala ridotta in colture sperimentali a variabili controllate, ma anche a livello territoriale a larghissima scala [Inoue Y. Et al. 2012].

### 4.3 TOMOGRAFIA

La tomografia (*Automatic Resistivity Profiling*) è una applicazione di recente introduzione in campo agricolo, che consente di effettuare stime sulle caratteristiche dei suoli su ampie superfici e a notevoli profondità senza la necessità di effettuare campionamenti lunghi e costosi.

L'utilizzo della tomografia permette di quantificare aspetti importanti dei suoli legati alla resistenza che essi oppongono al passaggio di una corrente elettrica di intensità nota dovuti principalmente a parametri di tessitura e alla concentrazione di ioni nella soluzione circolante.

La tomografia rientra nell'insieme delle tecnologie di misura attive, in cui lo strumento emette un segnale elettrico nel suolo e il dato ottenuto è legato all'intensità del segnale che, attraversata l'unità di suolo, ritorna ai sensori di misura. È una tecnologia di misura diretta poichè lo strumento deve entrare in contatto fisico con il suolo. È una misura non distruttiva perchè non modifica in alcun modo lo stato dei luoghi in cui viene impiegata e non richiede campionamenti.

#### 4.3.1 PRINCIPI

Il principio sulla quale si basa la tomografia è legato alla differente resistività dei materiali che compongono il terreno. La resistività è definita come la resistenza opposta da un corpo sottoposto ad una differenza di potenziale elettrico al passaggio di una corrente. Ciascun materiale ha una sua resistività specifica in funzione della sua composizione; nel caso dei suoli agricoli, altre fonti di variabilità sono costituite dalle dimensioni delle particelle di suolo, dalla loro distribuzione tridimensionale nello spazio e dalla densità.

I tomografi per indagini agrarie sono costituiti da telai isolati elettricamente dotati di coppie di ruote metalliche disposte tra loro a distanze calibrate in funzione della profondità del suolo che si intende analizzare, dotati di un sistema di localizzazione globale GPS. Attraverso una differenza di potenziale controllata fra le coppie di ruote viene indotta una corrente continua nel profilo e viene misurata in continuo la quantità di energia dispersa per effetto della resistività del suolo.

La risoluzione spaziale dei rilievi tomografici può essere variata molto semplicemente aumentando il numero di passaggi, riducendo la distanza tra di essi, o intersecando le linee di passaggio tra loro, sovrapponendole. La risoluzione deve

essere scelta in funzione della scala della variabilità attesa per la variabile di interesse e può variare da decine di metri a pochi centimetri.

In funzione delle condizioni del campo e del momento in cui viene eseguito il rilievo, valori di resistività maggiori possono indicare la presenza di particelle isolanti, di una maggiore quantità di aria nel profilo o di uno scarso contenuto idrico; valori inferiori sono indicativi di una maggiore densità, di un minore contenuto d'aria o di un maggiore contenuto idrico.

La scelta del momento più opportuno per l'esecuzione di un rilievo tomografico dipende dalla variabile di maggiore interesse: per la stima della tessitura, ad esempio, è necessario che lo stato idrico del terreno sia omogeneo in tutti i punti.

La tomografia accoppiata ad un sistema di geolocalizzazione restituisce i valori di georesistività sia in formato numerico che grafico; tramite algoritmi di interpolazione in ambiente GIS è possibile ottenere mappe spaziali di resistività a diverse profondità, e offre un fondamentale supporto per la stima di parametri pedologici difficilmente rilevabili con metodi tradizionali. L'interpolazione consente di stimare con buona approssimazione le caratteristiche di ciascun punto del suolo, tanto più precisamente quanto più saranno ravvicinati tra loro i passaggi del tomografo.

Conoscendo la composizione chimica, la tessitura e il contenuto idrico in pochi punti campione è possibile risalire alle caratteristiche dell'intera superficie oggetto di studio.

#### 4.3.2 ESEMPI E APPLICAZIONI

La tomografia (Fig. 4A) può essere proficuamente utilizzata in tutti i campi di studio in cui il parametro che si intende quantificare abbia una relazione con la resistività elettrica delle unità di suolo. L'analisi degli strati informativi restituiti dalla tomografia, ipotizzando i fattori che volta per volta possono interagire maggiormente con le proprietà elettriche risultano molto utili per interpretare dinamiche che spesso non sono rilevabili visivamente.

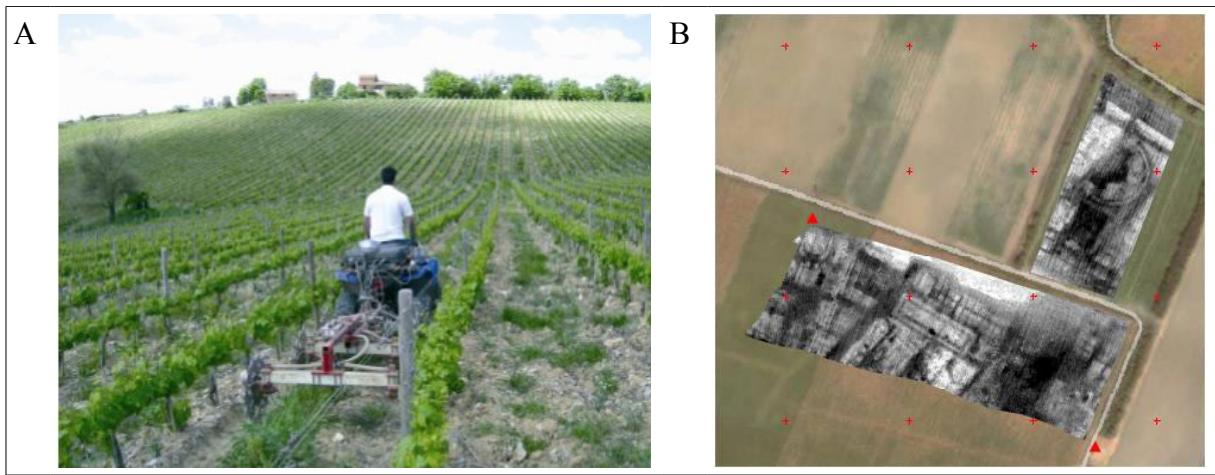


Fig. 4 Sistema di rilevazione ARP applicato ad un quad per lo studio delle caratteristiche fisiche di un vigneto (AgroNotizie web) (A); Indagine ARP per la ricerca di strutture archeologiche nel sito di Altino (VE) condotta dall'Università di Padova in collaborazione con la ditta SO.IN.G. (B)

Le caratteristiche geofisiche dei suoli possono variare in funzione di diversi aspetti e l'identificazione della variabile di maggior interesse a seconda dei casi rende la tecnologia *Automatic Resistivity Profiling* molto versatile in tutti quei campi di studio in cui è possibile associare le caratteristiche elettriche ai fattori originari che le hanno determinate, siano esse fattori naturali o antropici (Fig. 4B).

#### 4.4 MAPPA DI PRODUZIONE

La mappatura delle produzioni è una tecnologia ormai ampiamente collaudata per la quantificazione spaziale della capacità produttiva media di un campo coltivato. Si tratta di macchine raccogliatrici equipaggiate con sistemi di misura dei principali aspetti della coltura: produzione, volume di prodotto raccolto, umidità, velocità di lavoro, posizione della macchina, superficie raccolta. Sulla base di queste variabili principali, i *software* di cui le macchine sono dotate sono in grado di calcolare nuove variabili di interesse, quali ad esempio il peso secco, i consumi della macchina, superficie oraria raccolta e molte altre variabili utili all'imprenditore sia nella gestione agronomica del campo, sia in fase di pianificazione e organizzazione del cantiere di raccolta. Generalmente, il risultato di una mappatura di produzione si compone di una parte numerica, in cui vengono riversati tutti i parametri misurati e calcolati dal *software* in

dotazione, e da una parte grafica, che visualizza cartograficamente il *database*, rendendo di più semplice individuazione le aree di interesse.

La mappatura delle produzioni è uno strumento che risulta particolarmente utile quando si possieda una serie storica di mappe della stessa area, che permettano di stabilire con ampi margini di affidabilità le aree che risultano sistematicamente più o meno produttive. La presenza di comportamenti sistematici aiuta la delimitazione delle aree omogenee ed è sintomo della presenza di fattori intrinseci stabili fortemente influenti nei confronti della coltura. Aree che tendono a variare le loro produzioni nel tempo indicano la presenza di dinamiche in evoluzione o la necessità di una più accurata pianificazione e attuazione degli interventi agronomici.

#### 4.4.1 DEFINIZIONE E PRINCIPI

Con la mappatura delle produzioni si intende l'associazione di un qualsiasi parametro di produzione con le sue tre coordinate spaziali X, Y e Z. I sensori oggi disponibili nelle macchine raccogliatrici consentono di memorizzare ed elaborare simultaneamente sia variabili di tipo strettamente produttivo, sia di tipo più organizzativo o manageriale. La sensoristica più interessante in campo agricolo è quella finalizzata alla determinazione dell'umidità (Fig. 5 B) e della produzione (Fig. 5A) in termini assoluti e in rapporto alla superficie. Le macchine raccogliatrici sono sempre dotate di un sistema di localizzazione spaziale per la georeferenziazione delle misure registrate e di un *software* per la gestione e il processo dei dati in uscita dai sensori di produzione. In funzione del modello e del produttore della macchina, i sensori possono essere di diversi tipi.

I sensori di umidità più comuni possono essere: a) di tipo elettrico (misura della resistenza della corrente al passaggio di una corrente elettrica); b) di tipo spettrale (misura della riflettanza della granella nelle bande caratteristiche dell'acqua).

Tra i sensori di produzione: a) sensori di massa, poco utilizzati, misurano la massa del prodotto in entrata attraverso celle di carico; b) sensori volumetrici, che misurano il

volume del prodotto e necessitano della conoscenza dell'umidità e della massa volumica per poter calcolare correttamente la massa raccolta. La misura del volume può avvenire per via diretta (sistemi ottici o meccanici) o per via indiretta (resistività elettrica, meccanica). I sistemi ottici si basano sulla misura degli intervalli di tempo in cui il passaggio della granella interrompe un fascio di luce che attraversa la coclea; i sistemi meccanici si basano sul trasporto del prodotto attraverso elevatori a volumi noti, per cui è sufficiente moltiplicare il volume per il numero di settori per risalire al volume totale. Per quanto riguarda i sistemi indiretti, il sistema elettrico si basa sulla misura della permittività elettrica del fluido che passa attraverso un campo elettrico indotto; il sistema meccanico si basa sulla misura della forza che la granella in entrata applica su una piastra fornita di un dinamometro.

L'affidabilità delle strumentazioni in dotazione alle trebbie può variare in funzione del tipo di granella raccolta, ma anche delle sue caratteristiche di viscosità, densità apparente ed umidità; è buona norma procedere al settaggio di tutti i parametri della macchina prima di procedere alla mappatura, e in alcuni casi anche durante.

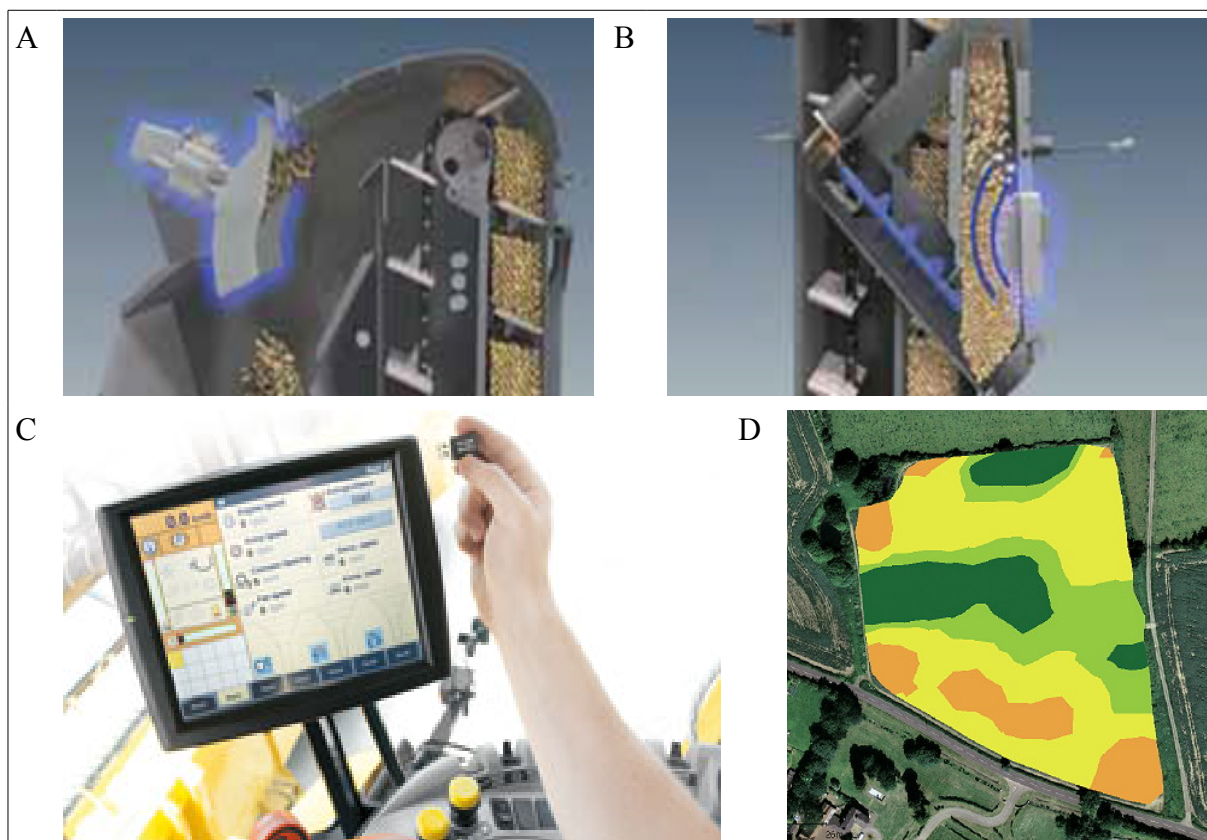
#### 4.4.2 ESEMPI ED APPLICAZIONI

La possibilità di mappare le rese agricole comporta due grandi vantaggi: il primo è la possibilità di memorizzare dei dati fondamentali nella pianificazione delle colture degli anni successivi e nella comprensione delle eventuali problematiche sorte durante il ciclo colturale della coltura; la seconda è la possibilità di avere parametri di valutazione oggettivi direttamente in campo nel momento stesso in cui si raccoglie, consentendo all'imprenditore di rendersi conto attraverso dati reali e obiettivi, della reale capacità produttiva che si è riusciti a raggiungere, alla sua distribuzione e grado di omogeneità nello spazio.

La maggior parte dei software in dotazione alle macchine raccogliatrici predisposte per effettuare la mappatura delle produzioni, sono in grado di visualizzare in continuo un riassunto puntuale dei principali indicatori di produzione, fatto molto importante in ambienti difficilmente accessibili quali le risaie, che non permettono di avere un'idea



globale delle produzioni a causa delle oggettive difficoltà nell'ingresso in campo (Fig. 5 C).



*Fig. 5: Sensore di produzione di tipo volumetrico (A); Sensore di umidità di tipo capacitivo (B); Monitor Intelliview 4 in dotazione alle mietitrebbiatrici New Holland (C); Mappa tematica di produzione ottenuta dal software New Holland Intelliview (D). © NewHolland Agriculture.*

I software dedicati alla *Precision Farming* sono in grado di fornire diversi tematismi, quali la mappa dell'umidità, che offre un valido aiuto nella valutazione dell'omogeneità dei tempi fisiologici di maturazione, la mappa dei consumi della macchina, legata alla maggior potenza erogata dal motore in funzione della quantità di biomassa presente in campo, la mappa delle produzioni (Fig. 5 D). Sono inoltre capaci di effettuare calcoli tra le variabili misurate, per fornire dati di immediato interesse quali la produzione per unità di superficie, la quantità di prodotto raccolta nell'unità di tempo, la produzione riferita ad un grado di umidità standard. Ogni variabile misurata o calcolata dalla macchina può essere visualizzata in forma numerica o grafica; se importata in ambiente GIS è possibile interagire con i dati in forma mista e confrontare le mappe con i rilievi di campo georiferiti.

## 4.5 PRESCRIZIONI E MAPPE PREVISIONALI

Nel corso degli anni sono state sviluppate un gran numero di attrezzature e di macchine adatte alle pratiche di *Precision Farming*. Le caratteristiche principali che contraddistinguono questa nuova generazione di macchine sono principalmente due: la capacità di agire in maniera definita dal punto di vista geografico sulle tre dimensioni dello spazio e la possibilità di variare l'intensità degli interventi.

Le attrezzature destinate alla pratica della *Precision Farming* si distinguono principalmente in due categorie: attrezzature passive e attrezzature attive.

Il primo gruppo comprende tutte quelle macchine che possono lavorare in maniera differenziata dal punto di vista spaziale sulla base di un programma definito a priori in funzione della variabilità spaziale e temporale riscontrata in campo. Appartengono a questo gruppo la maggioranza delle attrezzature oggi adottate in agricoltura, e presuppongono una valutazione per aree omogenee delle azioni da intraprendere sulla coltura.

Le attrezzature cosiddette “attive”, più complesse, sono state sviluppate con l'obiettivo di semplificare, se non evitare completamente, la fase di indagine preliminare limitatamente agli aspetti della coltura che possono essere valutati in maniera relativamente semplice al momento quale come ad esempio la presenza e la densità delle infestanti. Esse sono dotate di *software* complessi e di sensori di vario tipo che permettono “*on the go*” di trarre informazioni dalla coltura, processare il dato e modulare l'intervento direttamente in campo (vedi “Sensoristica in movimento”).

L'acquisizione e la georeferenziazione di informazioni relative all'ambiente agrario e al comportamento della coltura che su di esso insiste è finalizzata a fornire un supporto decisionale razionale per la scelta del più opportuno trattamento, in termini di tipologia, quantità e momento di intervento. Sulla base delle informazioni raccolte in fase di indagine, devono essere selezionate le variabili che più incidono sull'operazione colturale da effettuare (lavorazioni, concimazioni, diserbi, operazioni fitosanitarie) in

rapporto alla fase fenologica della coltura per ciascuna delle aree omogenee identificate. La determinazione degli interventi su base geografica è senza dubbio l'aspetto più complesso dell'applicazione della *Precision Farming* in scala di campo, perchè presuppone una profonda conoscenza delle tecniche agronomiche e della fisiologia vegetale nell'associare il trattamento più opportuno ad ogni area omogenea.

Ognuna delle operazioni conoscitive svolte in fase di indagine della variabilità fornisce un elemento per creare un quadro definito di quali siano i fattori più limitanti nello sviluppo della coltura, siano esse svolte sull'ambiente (terreni, acque) sia sulla coltura (indici di vegetazione, analisi di laboratorio). A conclusione della fase di acquisizione delle informazioni, è necessario delimitare da un punto di vista spaziale le aree che mostrano caratteristiche o risposte vegetative differenti ed elaborare un piano di coltivazione differenziato per ciascuna di esse.

Il risultato finale di questa operazione sarà un ulteriore strato informativo, in cui ad ogni *pixel* corrisponderà l'informazione relativa all'intervento specifico programmato per ogni area del campo: la mappa di prescrizione.

#### 4.5.1 SUPPORTO DECISIONALE

Lo studio della variabilità spaziale e temporale come supporto decisionale si basa sull'analisi dei dati di campo in modalità post-processing, finalizzata a contestualizzare i valori delle variabili raccolte attraverso una coppia di coordinate su un sistema di riferimento noto. Il risultato dello studio della variabilità è composto di due formati informativi fondamentali: una parte strettamente numerica, in cui ad ogni punto dello spazio è associata una coppia di coordinate e il valore della variabile considerata; una rappresentazione grafica che renda facilmente comprensibile ed interpretabile la notevole mole di dati numerici in forma di mappa. Entrambi i formati vengono generalmente elaborati in ambienti *software* GIS (*Geographic Information System*, o *Sistema Informativo Territoriale*) che presentano il vantaggio di poter interagire con i *database* sia in modalità numerica che grafica. L'elaborazione grafica ottenuta in ambiente GIS in realtà non è un'immagine, ma soltanto una rappresentazione visiva in

cui ad ogni *pixel* di mappa è associato un vettore di dati che conserva tutte le informazioni contenute nel *database*.

Qualora i dati originali dovessero essere stati raccolti in maniera puntuale e non sull'intera superficie del campo, è possibile impiegare appositi *software* geostatistici che consentono di risalire con buona approssimazione al più probabile valore di una variabile anche in punti o in aree non direttamente campionate, a patto che vengano rispettate le condizioni di stazionarietà, cioè se esiste una logica statisticamente e matematicamente valida che determini la variabilità. Funzioni geostatistiche sviluppate in ambito minerario, tra le quali la più utilizzata è il “*Kriging*”, consentono in maniera piuttosto rapida di stimare il più probabile valore di una variabile sulla base dei valori dei punti circostanti. Il concetto alla base del *Kriging* è che la variabilità di una caratteristica del suolo avrà un limite massimo e minimo definito e che, dati i valori relativi a due punti dello spazio il valore di un ipotetico terzo punto intermedio tra di essi sia compreso tra i valori dati. Questa assunzione è indubbiamente semplicistica, e raramente si verifica in natura; questo ha portato allo sviluppo di funzioni *kriging* sempre più complesse che consentissero di elaborare i più probabili valori attesi utilizzando una grande quantità di punti campionati, tenendo in opportuna considerazione il comportamento della variabilità in termini di trend e di valori in funzione della distanza. Per poter impiegare in maniera corretta la tecnica del *Kriging* è necessario operare a monte una analisi della variabilità dei punti noti per stabilire quale sia la scala reale della variabilità, verificare se i valori attesi dei punti noti ottenuti con il modello scelto corrispondano al valore misurato e stabilire il margine di errore. Le mappe spaziali che si ottengono in fase di *post-processing* saranno dunque composte dall'insieme dei dati reali e dei dati stimati.

Attraverso le indicazioni fornite dai *database* e dalla cartografia ottenuta vengono pianificate le cosiddette mappe di prescrizione, cioè la tipologia e le modalità di intervento necessarie a neutralizzare le condizioni ambientali che influenzano negativamente la coltura e ad evitare di agire in maniera inappropriata in aree omogenee che non ne evidenziano la necessità. Il processo fondamentale che porta alla redazione delle mappe di prescrizione a partire dalle indagini di campo risiede nella

corretta interpretazione dei dati registrati, che consenta di associare in maniera univoca un parametro misurato alla causa che lo origina, e soprattutto la determinazione dell'entità delle operazioni da svolgere sulla base delle esigenze colturali (quantità di principio attivo per unità di superficie, misura della concimazione..).

La mappa di prescrizione così elaborata verrà poi utilizzata mediante appositi *software* direttamente in campo, fornendo alle trattatrici e alle macchine operatrici le informazioni necessarie a svolgere in maniera autonoma gli interventi a *rateo variabile*.

#### 4.6 IPOTESI ED OBIETTIVI

La superficie risicola in Italia ammonta a 245.000 ha (Ente risi, 2011).

La coltura del riso, rispetto ad altri cereali, presenta alcuni vantaggi dal punto di vista sperimentale. L'adozione del sistema di irrigazione per sommersione continua annulla l'eventuale variabilità dovuta a stress idrici o a differenze nella circolazione dell'acqua nel suolo; viene eseguita su terreni pianeggianti, per cui non sono riscontrabili differenze in termini di ore di luce, eliofanìa, ruscellamento di acque di irrigazione e dei soluti, ventosità nei diversi punti del campo. Le variabili che devono essere quantificate e monitorate si riducono drasticamente rispetto ad altre colture effettuate tradizionalmente su superfici meno specializzate e risiedono principalmente nelle caratteristiche chimiche e fisiche delle diverse unità di suolo, nella presenza di eventuali infestanti e nella variabilità che può essere indotta con le lavorazioni, con i trattamenti fitosanitari, con le concimazioni.

La combinazione tra le variabili ambientali e le variabili morfologiche della pianta nel loro complesso (LAI, struttura della foglia, tasso di accrescimento della coltura) risultano determinanti nella determinazione della produzione (Sun *et al.*, 1999, Ghosh and Singh, 1998). La produzione risulta strettamente connessa all'efficienza dell'attività fotosintetica della pianta, al LAI e all'accrescimento raggiunto dalla pianta, in relazione alla quantità di biomassa prodotta e della sua struttura (Thakur and Patel,

1998, Lu *et al.*, 1999). D'altra parte, le particolari condizioni della risaia, legata alla permanente presenza dell'acqua può influenzare la possibilità di utilizzare asetticamente gli indici sviluppati per altri tipi di colture (Vaesen *et al.*, 2001; Patel *et al.*, 1985; Gilabert *et al.*, 1990).

Le variabili che più sembrano aver inciso sulla produzione nel corso dei due anni di prova sembrano essere la densità di erbe infestanti e la disomogeneità della densità di semina. Entrambi i fattori determinano importanti ripercussioni sulla competizione intraspecifica e interspecifica della singola pianta per la luce e per gli elementi nutritivi, per cui è prevedibile che la maggiore variabilità morfologica e produttiva della coltura sia ascrivibile a uno o ad entrambi questi aspetti. La variabilità competitiva in scala di campo si traduce in effetti macroscopici sulla morfologia della pianta, che possono essere quantificati in maniera efficace attraverso l'analisi spettrale delle bande di riflettanza che la coltura sottoposta a diversi gradi di competizione manifesta nelle zone del campo.

L'obiettivo del lavoro è di quantificare e classificare la variabilità spaziale e temporale allo scopo di isolare gli elementi determinanti nella composizione dello spettro della coltura e di utilizzare la risposta della radiazione elettromagnetica per determinare le cause originarie della variabilità.

## 5 MATERIALI E METODI

### 5.1 AREA DI STUDIO

Le prove sono state realizzate negli anni 2010 e 2011. L'area oggetto di studio è ubicata in agro del Comune di Ollastra (OR), Italia 8°43'40"E, 39°56'44"N, (WGS 84, Fig. 6). L'azienda ha una superficie complessiva di 35 ha, ad una quota altimetrica compresa fra 8.5 e 10.00 metri sul livello medio del mare.

È divisa in nove camere di cui due dipendenti (Camere B e I, rispettivamente dalle Camere A e H) e sette indipendenti. L'approvvigionamento idrico è garantito dal Canale Adduttore Tirso-Arborea, in condotta aperta. La gestione dell'acqua all'interno del perimetro aziendale è effettuata per caduta attraverso canali a pelo libero in cemento pressovibrato prefabbricati. Lo scarico avviene in maniera diretta in un canale di scolo che segue il perimetro aziendale, il cui pelo libero medio risulta ad una quota compresa tra 0.8 e 2.30 metri sotto il piano di campagna.



*Fig. 6: Panoramica dell'azienda area di studio e denominazione delle nove camere.*

Da un punto di vista geologico, l'area oggetto di studio è costituita quasi interamente da materiali di origine alluvionale del periodo Olocenico (Fig. 7). Nel suo lato Est confina con una formazione Pleistocenica di ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie (Litofacies del subsistema di Portoscuso, Sistema di Portovesme), di cui sono evidenti tracce nella composizione granulometrica dei suoli delle Camere A e B; a monte, la matrice principale originale dei depositi alluvionali è costituita da arenarie, da grossolane a micro-conglomeratiche, con intercalazioni di arenarie siltose (formazione di Nurallao) risalenti all'Oligocene superiore (Regione Autonoma della Sardegna). Il campo è situato in una leggera



depressione nei confronti delle formazioni circostanti ed è stato occupato in passato da una zona paludosa, come sottolineato dal toponimo tradizionale dell'area: “Sa Pauli” (l'acquitrino). La sistemazione a risaia e la delimitazione attuale delle camere è stata effettuata intorno agli anni '70, ed è sempre stata interessata dalla risicoltura in regime di monocoltura a scopo produttivo.

Da un punto di vista pedologico, secondo la Soil Taxonomy dell' U.S. Department of Agriculture i suoli dell'area sono classificati come “Mollic Xerofluvents Xererts”; secondo la classificazione FAO “Eutric Fluvisols”; I<sup>a</sup> classe di irrigabilità (Piano Generale delle Acque, Regione Autonoma della Sardegna).



Fig. 7: Stralcio della Carta geologica dell'area oggetto di studio

## 5.2 TECNICA COLTURALE

Allo scopo di interferire nella misura minore possibile con la variabilità intrinseca del campo, le operazioni colturali sono state effettuate in maniera analoga nei due anni di prova e in modo omogeneo sull'intera superficie.

La tecnica colturale adottata è quella tradizionale per sommersione continua.



Le varietà impiegate nell'area di studio differiscono nei due anni, anche in termini di distribuzione fra le camere. Lo studio della variabilità spaziale e temporale da un lato può essere falsata dalla differente sensibilità della varietà ai fattori ambientali, per contro la diversa risposta delle cultivar può mettere in maggiore evidenza la presenza di fattori limitanti specifici o assoluti nei confronti del genotipo.

Nel 2010 le varietà messe a coltura sono state Karnak (Camere A, B, C, F, G, H, I) e Volano (Camere D e E, vedi schede varietali in Appendice).

Nel 2011, sono state impiegate le varietà Carnise (Camera A), Karnak (Camere B, C, F, G, H, I) e Libero (Camere D e E).

Le varietà Karnak, Carnise e Volano appartengono alla specie *Oryza sativa* subspecie *Japonica*, Libero alla subspecie *Indica*. Le principali differenze da un punto di vista strutturale e fisiologico sono riportate in tabella 1 e risiedono nell'altezza del culmo, nella forma, dimensione e portamento della foglia, nelle dimensioni del granello e nell'aristatura. Rispetto a quanto riportato nelle schede varietali dell'Ente Risi e dei costitutori, la durata del ciclo biologico è risultata sempre leggermente più breve.

Tabella 1: Principali caratteri biomorfologici delle varietà utilizzate

Varietà	Taglia	Portamento foglia	Portamento foglia paniculare	Aristatura	Classificazione merceologica	Ciclo vegetativo	Semina - Spigatura	Massa volumica granella secca (0% di U.)
	cm					gg	gg	kg·m <sup>-3</sup>
Carnise	80	Intermedia	Orizzontale	Mutica	Lungo A	150	-	508.66
Karnak	83	Intermedia	Orizzontale	Semimutica	Semiaffusolato	160	95	507.02
Libero	78	Intermedia	Intermedia	Mutica	Lungo B	150	95	577.36
Volano	110	Intermedia	Orizzontale	Mutica	Semiarrotondato	155	100	482.53

La prova relativa al 2010 è stata seminata il 17 maggio, quella del 2011 il 15 maggio; la durata dei cicli colturali previsti a livello medio è abbastanza simile, (Libero 150, Karnak e Carnise 160, Volano 155 giorni dalla semina alla maturazione)

anche se generalmente in Sardegna la maturazione risulta essere leggermente anticipata.

Le operazioni colturali effettuate sono state identiche nei due anni:

- interrimento dei residui colturali con una leggera aratura alla fine della campagna precedente, tra novembre e marzo in funzione delle precipitazioni;
- erpicatura;
- livellamento laser;
- affinamento del letto di semina con fresatura finale fino a 25 cm di profondità, massimo spessore del terreno esplorato dalle radici in condizioni di sommersione continua (Spanu *et al.*, 2004) e per preservare l'azione impermeabilizzante della suola di lavorazione.

La semina è stata eseguita a spaglio con una seminatrice centrifuga in risaia allagata adottando una densità media di 500 semi germinabili per m<sup>2</sup>.

Per contenere l'insorgere di fonti di variabilità esterne, gli interventi agronomici in termini di irrigazione e concimazione sono stati eseguiti uniformemente in tutte le camere,

La distribuzione distribuzione di agrofarmaci ha richiesto un trattamento differenziato per contenere una forte infestazione di giavoni e riso crodo verificatasi in particolare nel 2010.

Per il controllo delle infestanti sono stati utilizzati *Penoxulan + Profoxydim + Cyhalafop-butyl* e *Propanil + MCPA* in due interventi durante l'accestimento (4 giugno (19 Days After Sowing - DAS) e 24 giugno (39 DAS) nel 2010;

Nel 2011 i trattamenti sono stati differenziati per le due subspecie impiegate.

Per le varietà Karnak e Carnise il primo trattamento è stato eseguito il 28 maggio (14 DAS) con *Cyhalofop-butyl*; il secondo (19 DAS) con *Penoxulam*; il terzo (44 DAS) con *Propanil + MCPA*. Per il Libero è stato utilizzato *Propanil + MCPA* (37 DAS) e *Cyhalofop-butyl* (82 DAS).

Per la varietà Libero, gli interventi sono stati eseguiti a 14 DAS, e 37 DAS.

Sono stati effettuati tre trattamenti fungicidi contro la *Pyricularia grisea* (Cooke) con *Tricyclazole* nel 2010, due nel 2011.

Nella 2010 è stata effettuata una concimazione in presemina con 95 kg ha<sup>-1</sup> di N, 70 kg ha<sup>-1</sup> di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 75 kg ha<sup>-1</sup> di K<sub>2</sub>O; nel 2011 sono stati distribuiti 90 kg ha<sup>-1</sup> di N, 95 kg ha<sup>-1</sup> di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 75 kg ha<sup>-1</sup> di K<sub>2</sub>O. In copertura sono stati distribuiti 30 kg ha<sup>-1</sup> di N nel 2010 e 35 kg ha<sup>-1</sup> nel 2011.

Al momento della trebbiatura le paglie sono state trinciate per rendere più agevole il loro interrimento.

In entrambi gli anni di prova nella capannina meteorologica del Campo Sperimentale “Santa Lucia” della sezione di Agronomia, Coltivazioni erbacee e Genetica del Dipartimento di Agraria dell'Università di Sassari (Comune di Zeddiani, OR), ubicata ad alcuni chilometri dalla sede delle prove, sono state registrate le precipitazioni e la temperatura massima e minima su base giornaliera.

### 5.3 DETERMINAZIONI E RILIEVI

Ciascun anno, in ogni camera sono stati individuati e georiferiti 4 punti di campionamento (GPS GR1, Topcon Corp., Japan; GPS GNNS Leica GS09 Leica Geosystems AG, Switzerland) nei quali sono state effettuate le determinazioni e i campionamenti, tenendo conto della distanza dagli argini per minimizzare l'effetto bordo e considerare la risoluzione spaziale dei rilievi satellitari (5x5 m). A ciascun punto di campionamento è stato assegnato un identificativo composto dall'identificativo della Camera di appartenenza e da un numero progressivo (C X – B

Y). Nel 2010 i punti sono stati scelti in maniera del tutto arbitraria secondo uno schema regolare per linee parallele agli argini delle camere (Fig. 8A); nel 2011, constatata la presenza di una variabilità non prevista nella densità di semina, si è preferito scegliere le aree di saggio in maniera da poter monitorare l'effetto della densità di piante nell'evoluzione della coltura (Fig. 8B).

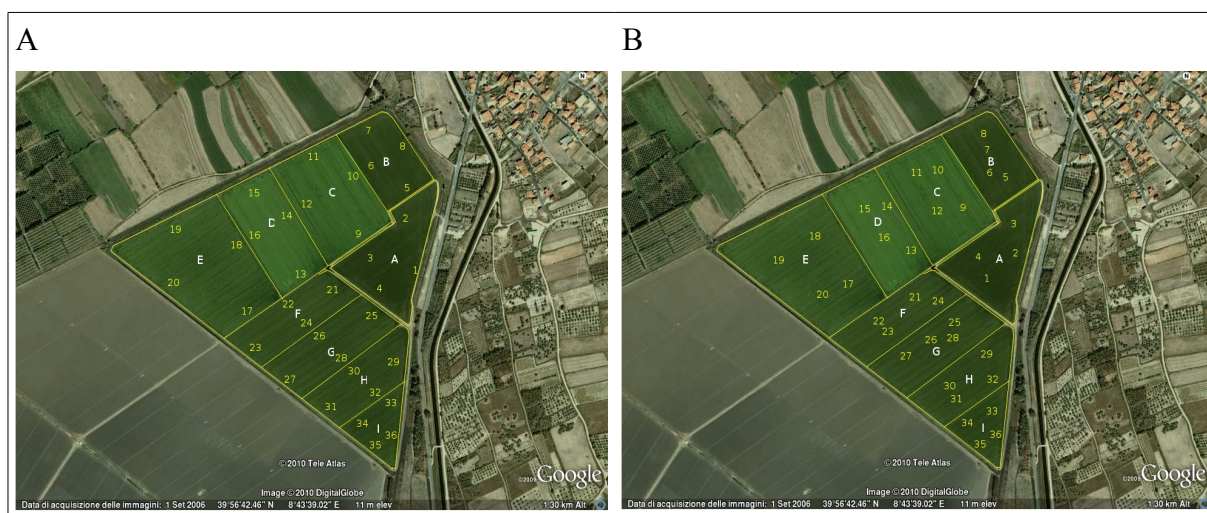


Fig. 8: Denominazione delle camere e delle aree di saggio nel 2010 (A) e nel 2011 (B).

In ciascuno dei punti di campionamento sono state effettuate a cadenza settimanale le letture del valore di SPAD (*Soil-Plant Analytical Development*, 502 Plus, Konica Minolta Sensing, Inc., Japan) sulle ultime trenta foglie completamente espanse.

Ogni due settimane sono stati prelevati dei campioni di materiale vegetale. Nel 2010 i prelievi hanno riguardato esclusivamente le 30 foglie completamente espanse, mentre nel 2011, in corrispondenza dei rilievi spettrali, sono stati prelevati anche campioni di piante intere su una superficie di  $0.25 \text{ m}^2$ . Sui campioni prelevati sono stati determinati la sostanza secca e il contenuto in azoto, secondo la metodica di digestione acida Kjeldahl. Durante il 2010 è stata misurata la superficie delle foglie campionate (Planimetro LI-3100 *Leaf Area Meter*, Li-cor Inc., USA) e calcolata la variabile ALA (*Average Leaf Area*) come media delle superfici delle trenta ultime foglie completamente espanse. I campionamenti e le determinazioni effettuate su di essi sono

finalizzati all'acquisizione di parametri di confronto rispetto alle misurazioni elettromagnetiche.

Durante il ciclo colturale in entrambe le campagne sono state eseguite tre letture di LAI (*Leaf Area Index*, LAI-2200. Li-Cor Inc, USA), determinate come media di due misure per ciascun punto.

A maturazione raggiunta, sono stati prelevati campioni di piante intere su una superficie di un m<sup>2</sup> per ciascun punto di campionamento; sul campione sono state determinate tutte le principali componenti della produzione e delle caratteristiche vegetative della pianta (Tab. 2).

*Tabella 2: Determinazioni effettuate sui campioni prelevati a maturazione nelle aree di saggio.*

Parametri biomorfologici	Produzione	Azoto	Biomassa
Altezza inserzione foglia bandiera (cm)	Numero totale Pannocchie m <sup>-2</sup>	Contenuto in azoto nella granella (%)	Peso totale campione piante (g)
Altezza inserzione pannocchia (cm)	Numero pannocchie sterili m <sup>-2</sup>	Contenuto in azoto nelle paglie (%)	Peso paglie (g)
Altezza totale (cm)	Numero pannocchie fertili m <sup>-2</sup>		
Distanza inserzione foglia bandiera- inserzione pannocchia (cm)	Produzione di risone (gm <sup>-2</sup> , a 0 e 13 % di umidità)		
Lunghezza pannocchia (cm)	Peso di 1000 cariossidi (g)		
	Cariossidi fertili per pannocchia (n)		
	Cariossidi sterili per pannocchia (n)		

Al momento della raccolta sono state acquisite le mappe di produzione georeferenziate ottenute utilizzando una mietitrebbia dotata della sensoristica *New Holland Intelliview Software*. La calibrazione è stata effettuata utilizzando i pesi effettivi dei silos della trebbia (Karnak, Carnise e Volano), per via volumetrica utilizzando la massa volumica determinata in campo (su Libero). Le mappe ottenute sono state corrette sulla base delle rese misurate in campo per limitare l'errore di stima

della macchina dovute alle differenti caratteristiche di massa volumica, viscosità e densità apparente del granello di ciascuna delle varietà coltivate.

#### 5.4 MISURE SPETTRALI RILEVATE IN CAMPO

Gli indici vegetazionali elaborati, riportati in tabella 3, sono stati calcolati a partire dai rilievi effettuati mediante spettrometro portatile in modalità *proximal sensing* (FieldSpec, Analytical Spectral Devices, Inc., USA) contestualmente alle letture del LAI. Le letture sono state acquisite con una risoluzione spaziale di 10 cm circa, nell'intervallo di radiazione spettrale elettromagnetica tra 325 e 1075 nm, con una risoluzione di 1nm. Le letture sono state effettuate tenendo in considerazione le condizioni atmosferiche e acquisendo tre misurazioni per ciascun punto con un angolo di 45° rispetto alla superficie della coltura.

Tabella 3: Indici spettrali e relative formulazioni utilizzate.

<b>Structural Indices</b>	<b>Formula</b>
NDVI	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$
GNDVI	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN})$
WDVI	$\text{NIR} - \text{Slope} * \text{RED}$
PVI	$1/\text{RADQ}(\text{Slope}^2 + 1 * (\text{NIR} - \text{Slope} * \text{RES} - \text{Intercept}))$
SAVI	$\text{NIR} - \text{RED} / (\text{NIR} + \text{RED} + \text{L}) (1 + \text{L})$
OSAVI	$(1 + 0,16) * (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 0,16)$
MSAVI	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + (1 + (1 - \text{Slope}^2 * \text{WDVI} * \text{NDVI})))$
MTVI	$1,5 * (1,2 * (\text{NIR} - \text{GREEN}) - 2,5 * (\text{RED} - \text{GREEN}))$
MTVI2	$1,5 * (1,2 * (\text{NIR} - \text{GREEN}) - 2,5 * (\text{RED} - \text{GREEN})) / ((2 * (2 * \text{NIR} + 1)^2 - (6 * \text{NIR} - 5 * (\text{RED})^{0.5}) - 0,5))$
EVI	$2,5 * ((\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 6,5 * \text{RED} - 7,5 * \text{BLU} + 1))$
EVI2	$2,5 * ((\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + 2,4 * \text{RED} + 1))$
GEMI	$z(1 - 0,25z) - (\text{RED} - 0,125) / (1 - \text{RED}); z = (2 * (\text{NIR}^2 - \text{RED}^2) + 1,5 * \text{NIR} - 0,5 * \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + 0,5)$

Ciascuno degli indici calcolati ha una sua funzione specifica e le relative formulazioni sono mirate a cogliere diversi aspetti della coltura, a massimizzare le variabili di interesse e a limitare gli effetti di eventuali interferenze ambientali. Tra gli indici impiegati, l'indice più utilizzato in assoluto è il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), sviluppato da Rouse *et al.*, (1974), anche se tende a saturare molto facilmente in situazione di colture dense e mostra delle relazioni non lineari con

alcuni parametri biofisici quali il LAI quando raggiunge valori superiori a 3 (Baret & Guyot, 1991; Lillesaeter, 1982; Basso *et al.*, 2005).

Per ovviare a questo problema sono stati sviluppati molti altri indici spettrali, tra i quali i più utilizzati risultano, GNDVI e SAVI; Alcuni indici, quali PVI, WdVI e MSAVI oltre ai specifici valori di riflettanza, contengono nelle loro formulazioni anche i coefficienti di correzione *Slope* e *Intercept of the soil line*, che tengono in maggiore considerazione il rumore di fondo dovuto al terreno e alle condizioni ambientali. Per lo stesso motivo, a partire dall'indice SAVI è stato sviluppato l'indice MSAVI (*Modified SAVI*) che contiene un fattore di autocorrezione che varia in funzione dell'effetto dovuto alle interferenze spettrali del suolo (Qi *et al.* 1994). TVI (*Triangular Vegetation Index*) è stato sviluppato per determinare l'energia assorbita dai pigmenti vegetali attraverso la differenza tra la riflettanza nella banda del vicino infrarosso e del rosso, in relazione all'energia riflessa nella banda del verde. TVI è calcolato come l'area del triangolo formato dal picco di riflettanza del verde, quella nel vicino infrarosso e il punto di minore riflettanza nel rosso. Anche TVI ha subito delle modificazioni che hanno portato allo sviluppo di MTVI e MTVI2 (Huete 1988) che attraverso l'integrazione di un fattore legato al vicino infrarosso risultano meno sensibili all'effetto della clorofilla, ma più sensibili alle variazioni di LAI. La sostituzione della lunghezza d'onda di 750 nm con 800 nm rende l'indice più influenzabile dalla struttura della coltura e della foglia. MTVI2, oltre a conservare un buon grado di sensibilità sia nei confronti dell'effetto della clorofilla che del LAI, contiene un fattore di autocorrezione nei confronti dell'effetto background del suolo (Huete (1988)). L'*Enhanced Vegetation Index* (EVI; Huete *et al.*, 1997) viene utilizzato per mappare il riso e per analizzare le condizioni della vegetazione (Xiao *et al.*, 2005; Xiao *et al.*, 2006; Sakamoto *et al.*, 2009) e presenta notevoli vantaggi rispetto a molti altri indici grazie alla presenza della banda del blu nella sua equazione (Motohka *et al.*, 2011; Chengyuan *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2003) ; ad oggi però molti satelliti non includono il sensore per questa banda. Il problema è stato parzialmente arginato sviluppando l'indice EVI2, che riesce a fornire valori molto simili a EVI utilizzando soltanto le bande del rosso e del vicino infrarosso Jiang *et al.*, (2008) . Il *Global*

*Environmental Monitoring Index* (GEMI, Pinty and Verstraete (1992) è stato invece sviluppato per essere meno sensibile alle interferenze di tipo atmosferico.

Generalmente, gli indici derivati dalla banda del *red-edge* si sono dimostrati i più affidabili nella stima del contenuto in azoto della coltura (Stroppiana *et al.*, 2006; Yuh-Jyuan LEE *et al.*, 2011, Cammarano *et al.*, 2011)

## 5.5 IMMAGINI SATELLITARI

È stata acquisita una serie multitemporale di immagini satellitari (4 nel 2010, 5 nel 2011) con una risoluzione spaziale di 5x5 m su 5 bande spettrali: blu (BLUE; 440-510 nm), verde (GREEN; 520-590 nm), rosso (RED; 630-690 nm), *red-edge* (RE; 690-730 nm) e vicino infrarosso (NIR; 760-880 nm) dalla società RapidEye A.G. (Brandenburg, DE, [www.rapideye.de](http://www.rapideye.de)).

Le bande misurate sono state utilizzate per il calcolo dell'indice NDVI (NDVI, Rouse *et al.*, 1974):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

La costellazione RapidEye è costituita di 5 satelliti disposti lungo la stessa orbita eliosincrona ad una quota di 630 km, equipaggiati con sensore multispettrale.

L'ampiezza spaziale dei passaggi è di 77 km, la frequenza di rivisitazione è giornaliera, la frequenza di rivisitazione al Nadir è di 5.5 giorni. Ogni satellite è in grado di acquisire dati spettrali da una superficie complessiva al suolo di 4 milioni di chilometri quadrati al giorno.

Le immagini sono state opportunamente corrette da un punto di vista radiometrico e spaziale, georeferenziate sul sistema di coordinate UTM WGS84 e analizzate utilizzando un GIS (ArcGIS) (Richter 2011). Per stimare l'accuratezza degli indici nella stima delle relative caratteristiche vegetative, in questo studio sono stati considerati dei *buffer* centrati sui punti di campionamento. In ognuno degli intorni sono stati estratti i valori medi di riflettanza per ogni banda spettrale e i singoli indici



sono stati calcolati sulla base delle medie e confrontati con i dati determinati attraverso i campionamenti in campo.

## 5.6 ANALISI DI CORRELAZIONE

L'analisi di correlazione effettuata si basa sull'assunto che generalmente esiste una relazione diretta tra i valori di NDVI della coltura durante il ciclo colturale e i valori di produzione. Con questa analisi si intende individuare i punti in cui questa relazione non è verificata, con l'ipotesi che esistano delle variabili localizzate e non controllate che modifichino il rapporto tra produzioni e risposta spettrale.

La presenza di un'alta concentrazione di infestanti con caratteristiche spettrali simili alla pianta del riso, può determinare elevati valori di indice ma basse produzioni per quell'area, così come potrebbe accadere in zone in cui l'eccessiva densità di semina possa aver portato a livelli di competitività intraspecifica tale da inficiare le produzioni.

Durante gli anni di studio, è stata prodotta una serie multi-temporale di mappe di correlazione, calcolando i coefficienti di Pearson, tra resa e indice vegetazionale NDVI. In particolare, sono state elaborate le mappe di correlazione:

- Resa 2010 – indice NDVI relativo a ciascuna data disponibile (come riportato nel paragrafo 5.5);
- Resa 2011- indice NDVI relativo a ciascuna data disponibile (come riportato nel paragrafo 5.5);
- Resa 2010/2011 - indice NDVI relativo a ciascuna data disponibile associando entrambi gli anni di studio. In particolare, poiché le date di acquisizione delle immagini satellitari nel 2010 e nel 2011 molto prossime, se non coincidenti, è stato possibile condurre l'analisi di correlazione per gli anni 2010 e 2011 contemporaneamente.

In associazione a ciascuna mappa di correlazione prodotta, sono state elaborate le relative mappe di significatività con livello di accettazione  $p\text{-val.}=0.05$ .

L'analisi è stata effettuata utilizzando un programma, appositamente scritto, in Matlab7.7.

L'analisi fornisce una rappresentazione grafica che consente di visualizzare immediatamente le aree spaziali critiche, che necessitano di ulteriori indagini per dare una spiegazione sulle origini della variabilità.

## 5.7 TOMOGRAFIA

All'inizio della campagna 2012, per indagare in maniera più completa le origini della variabilità spaziale, è stata eseguita una tomografia georesistiva *Automatic Resistivity Profiling* (ARP, Geocarta S.A., France), che permette di ottenere le mappe georiferite di caratterizzazione in continuo della variabilità del suolo attraverso l'analisi geofisica ed elettromagnetica di superficie. La mappatura è stata eseguita lungo un transetto a linee parallele a una distanza di 8-10 m, in condizioni di suolo asciutto e lavorato, già pronto per la successiva semina. Le mappe ottenute riguardano i profili di suolo a profondità crescenti: 0-0.5 m, 0.5-1 m, 1-1.8 m, e restituiscono i valori di georesistività, che sono essenzialmente legati alla tessitura del profilo.

## 5.8 ZONAZIONE

La variabilità spaziale delle produzioni del 2010 e del 2011 è stata analizzata calcolando la differenza tra i livelli di produzione di tutti i punti estratti dalla mappa di produzione ed espressa in termini percentuali (Blackmore, 2000), secondo l'equazione:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[ \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{\bar{y}_k} * 100 \right]$$

dove  $n$  è il numero di anni oggetto di studio;

$k=1, \dots, n$  è il numero intero corrispondente a ciascun anno  $y_{ik}$  ;

$\bar{y}_i$  è la differenza media della produzione di ciascun punto  $i$ , espresso in percentuale;

$\bar{y}_k$  è la media della produzione dell'intero campo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) in ciascun anno  $k$ ;

$\bar{y}_{i,k}$  è la produzione del punto  $i$  nell'anno  $k$ .

Le zone che presentano elevati valori di  $\bar{y}_i$  sono associate ad alte produzioni, mentre a bassi valori di  $\bar{y}_i$  corrispondono produzioni inferiori.

Secondo Pringle *et al.* (2003), la variabilità temporale della produzione della coltura, espressa in gradi di stabilità, dovrebbe essere calcolata come variazione temporale (dato di produzione del punto meno la media di campo). La variazione temporale è calcolata come segue:

$$\bar{\sigma}_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{i,k} - \bar{y}_{i,n})^2$$

dove  $\bar{\sigma}_i^2$  rappresenta la variazione delle produzioni in ciascun punto  $i$ ;

$\bar{y}_{i,k}$  è la produzione del punto  $i$  nell'anno  $k$ ;

$\bar{y}_{i,n}$  è la media della produzione di tutti gli anni considerati.

La variazione temporale può cambiare in maniera consistente in funzione della soglia di stabilità scelta (Blackmore 2000). Per evitare il problema di una determinazione errata della soglia di stabilità, è stata applicata una *unsupervised k-means clustering technique* ai dati di variabilità spaziale e temporale. La procedura prevede la classificazione dei valori di un *dataset* in un numero prestabilito di classi (Duda and Hart, 1993). L'analisi è stata svolta utilizzando un programma scritto appositamente in Matlab 7.7. Per valutare l'efficacia nell'identificazione e nella delimitazione delle aree omogenee è stato condotto un test di separabilità fra le classi. Sono stati utilizzati il *Transformed Divergence Separability* test e il test di Jeffries-Matusita, che restituiscono valori da 0 a 2.0 per indicare il grado di separabilità fra le

classi. Valori maggiori di 1.9 indicano una buona separabilità statistica delle coppie di classi.

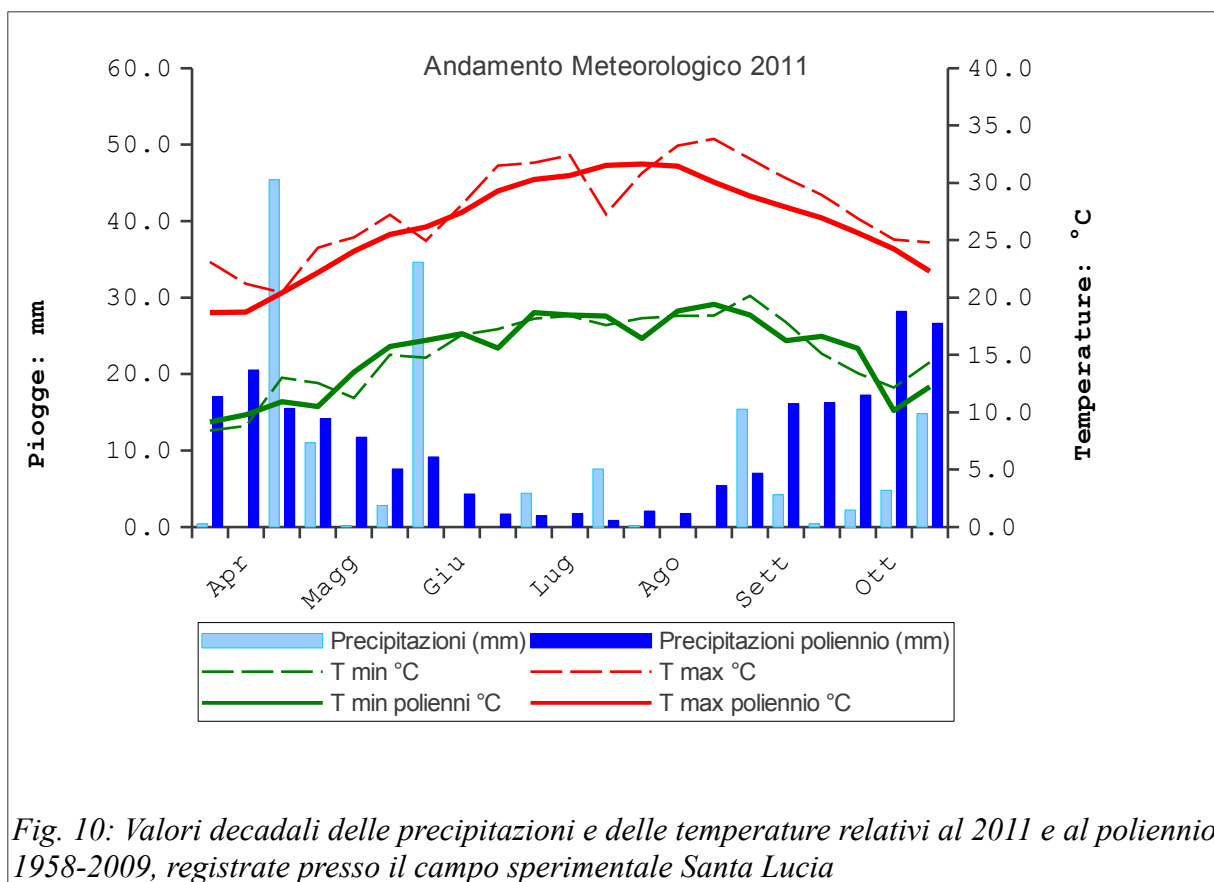
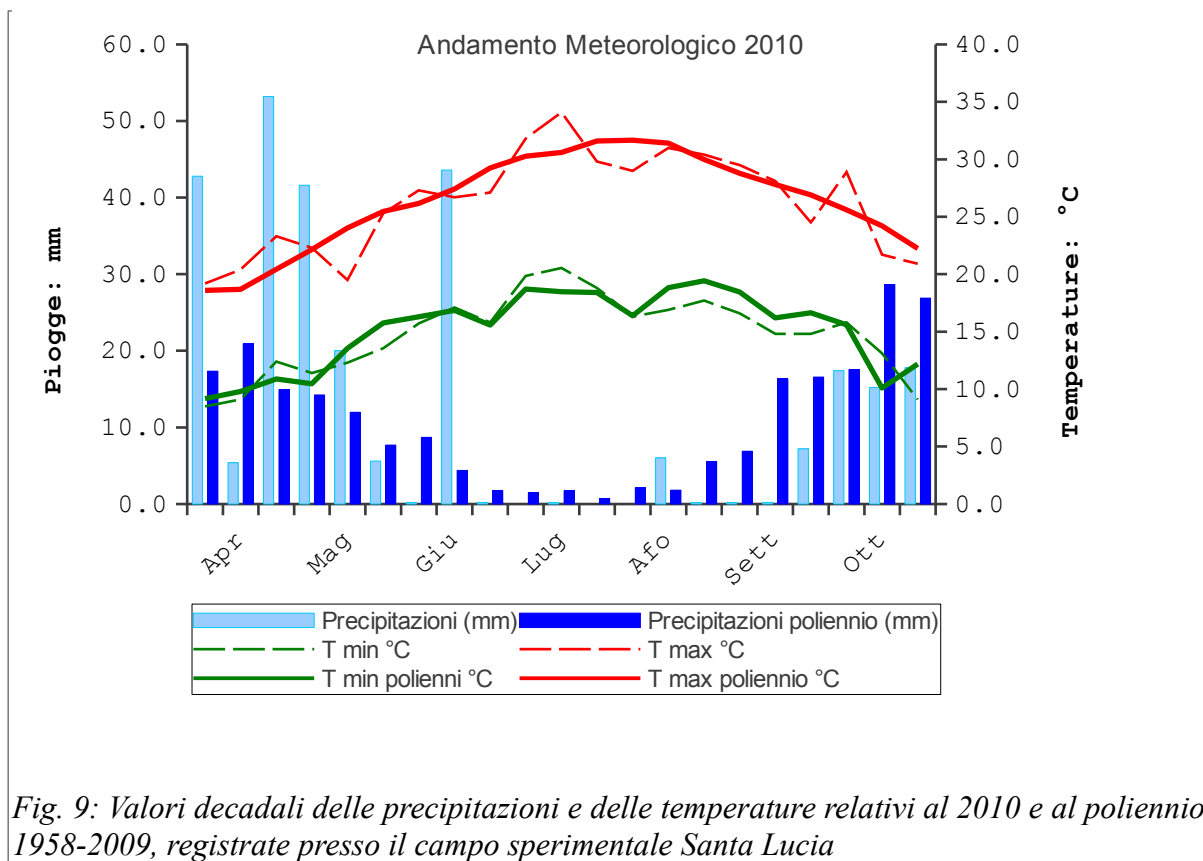
## 6 RISULTATI E DISCUSSIONE

### 6.1 ANDAMENTO METEOROLOGICO

L'andamento meteorologico registrato nei due anni di prova, è caratterizzato da evidenti anomalie sia da un punto di vista termico che meteorico. I valori decadali mettono in evidenza una temperatura massima generalmente più alta della media dei 50 anni, tuttavia si registra un picco inferiore alla media del poliennio a cavallo di luglio e i primi giorni di agosto, in corrispondenza della fioritura. Su base giornaliera le temperature minime hanno registrato valori decisamente più bassi della media, raggiungendo picchi di 14 °C nel 2010 a 83 DAS e 15 °C nel 2011 a 87 DAS.

In entrambi gli anni sono state registrate delle precipitazioni, anche relativamente consistenti, abbastanza anomale rispetto alla media poliennale (6 mm nel 2010 a 88-90 DAS; 7 mm nel 2011 a 72 DAS).

Si ritiene che tale andamento meteorologico, caratterizzato particolarmente dai valori di temperatura molto inferiori rispetto agli *optimum* della specie, hanno verosimilmente influito sulla delicata fase di fioritura determinando una minore allegagione e, conseguentemente, sulla produzione di risone.



## 6.2 PRODUZIONE

### 6.2.1 CAMPIONAMENTI MANUALI DEL 2010

Le produzioni in risone all'umidità standard del 13 % determinate sulle aree di saggio mostrano una distribuzione di frequenza piuttosto dispersa (Fig. 11 A e B).

Nel 2010 i valori medi di produzione maggiore e minore rispetto alla totalità delle camere ricadono all'interno delle Camere D e E (cv. Volano), per cui è difficile attribuire le differenze produttive al fattore “cultivar” (Fig. 12).

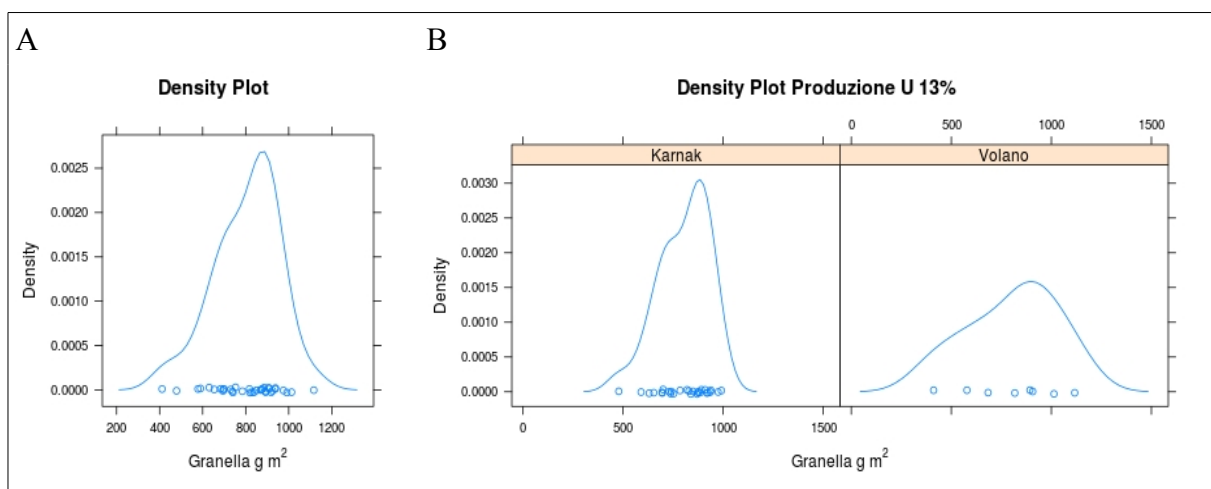
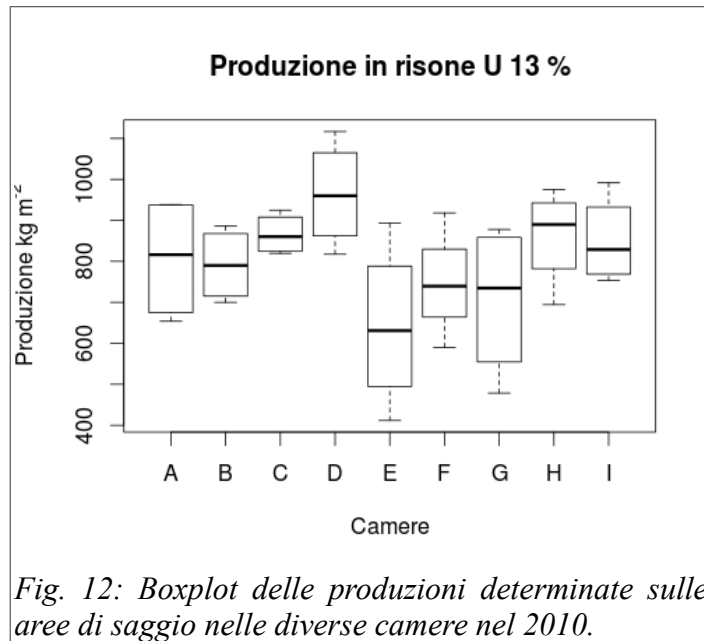


Fig. 11: Grafico delle distribuzioni di frequenza complessive delle rese determinate nelle aree di saggio, riportate ad umidità del 13% (A) e differenziate per varietà (B) nel 2010.

Anche per effetto della consistenza delle due popolazioni (8 osservazioni su Volano e 28 su Karnak) il test di Barlett per l'omogeneità della varianza rispetto alle camere evidenzia un *p-value* piuttosto alto (0.659), per cui si può affermare che è valida l'ipotesi H<sub>0</sub> e le varianze possono essere considerate omogenee; il test di Bartlett risulta invece significativo (*p-value* 0.0267) per le varianze nei confronti della varietà.

L'ANOVA rispetto alle varietà ha un *F-value* calcolato molto basso rispetto a F tabulato ( $8 \cdot 10^{-4} < 250.8$ ) e un *p-value* alto (0.978), pertanto le medie di produzione non possono essere considerate statisticamente differenti rispetto alla varietà.



Le varietà impiegate nel 2010 sono caratterizzate da componenti produttive che tendono a compensarsi. Karnak ha prodotto un maggior numero di culmi per unità di superficie, raggiungendo un maggior numero di pannocchie (513.1 pannocchie fertili m<sup>-2</sup> contro 452.5 di Volano) e sterili (rispettivamente 47.2 - 32.5). A parità di numero di cariossidi fertili per pannocchia (56.6 - 56.1) il risone raggiunge un peso inferiore (peso di 1000 cariossidi, in grammi, 36.2 in Karnak, 40.2 in Volano). Nei campionamenti effettuati manualmente nei singoli punti di riferimento, la produzione totale è risultata pressoché identica (804.2 in Karnak, 802.5 in Volano) nonostante la produzione di Karnak sia risultata decisamente più omogenea rispetto a Volano, principalmente a causa di una forte infestazione da *Echinochloa crus-galli sp.p* e da riso crodo (*Oryza sativa* L. var. *sylvatica*), localizzata nell'area NW della camera D e nel settore W della camera E. La presenza di infestanti strutturalmente e fisiologicamente molto simili al riso potrebbe inoltre determinare un maggior "rumore di fondo" nelle letture spettrali, poichè a maggiore densità di infestanti (e maggiore riflettanza nelle bande utilizzate) corrisponde minore resa in granella. L'elevata competizione subita dalla varietà Volano, ha generato una fortissima difformità di produzione da un punto di vista spaziale, con picchi di produzione da 1116.7 g m<sup>-2</sup> (massimo CD B13, U standard 13%) a 411.5 g m<sup>-2</sup> (CE B20, minimo). La varietà

Karnak ha beneficiato di una inferiore presenza di infestanti, individuate principalmente nei settori W delle camere F e G, riducendo le differenze tra il punto che ha mostrato la produzione maggiore (991.5) ed inferiore (478.6).

L'analisi della matrice di correlazione dei principali parametri produttivi al momento della raccolta evidenzia l'intimo rapporto tra la produzione e la crescita della porzione aerea della pianta, sia in termini di biomassa che di fertilità delle pannocchie, dove la linea tratteggiata rappresenta la relazione supposta lineare tra le variabili e la linea continua rappresenta un modello di regressione polinomiale (Fig. 13).

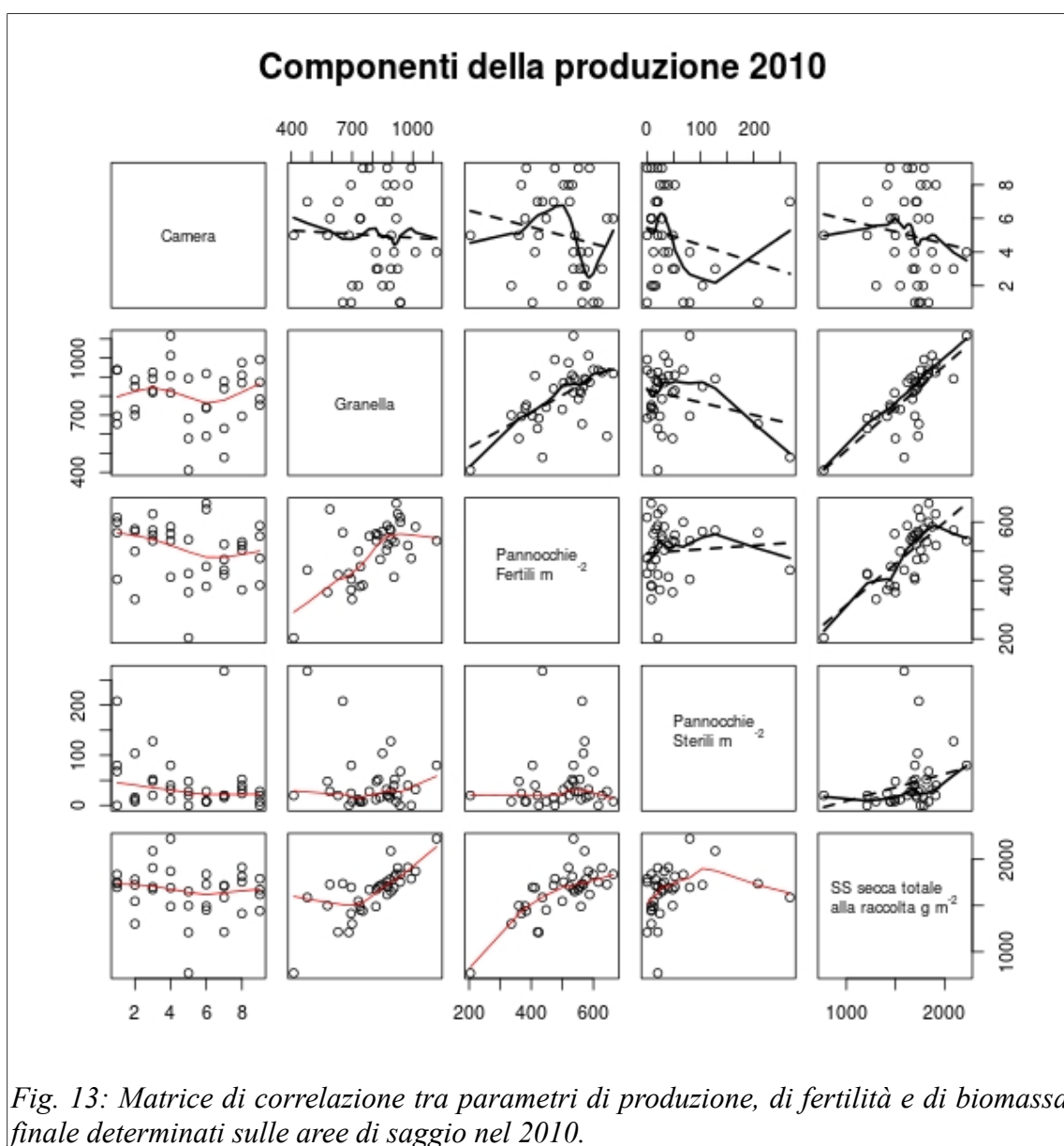


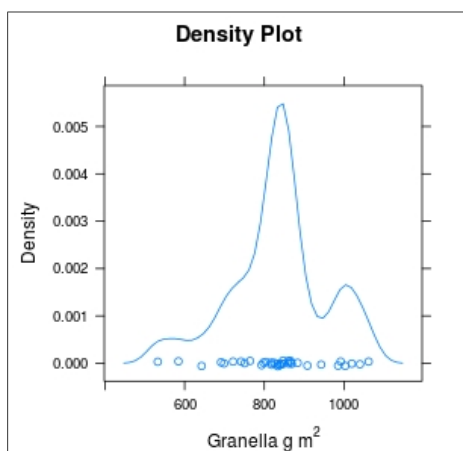
Fig. 13: Matrice di correlazione tra parametri di produzione, di fertilità e di biomassa finale determinati sulle aree di saggio nel 2010.



## 6.2.2 CAMPIONAMENTI MANUALI DEL 2011

L'analisi delle produzioni del 2011 è resa più complessa dalla presenza di due nuove fonti di variabilità.

- La varietà Libero, coltivata nelle camere D ed E presenta caratteristiche morfologiche e produttive decisamente differenti rispetto alle varietà Carnise e Karnak, che per contro si presentano molto simili da tutti i punti di vista; il fattore varietale si è mostrato in maniera molto evidente.
- La forte disomogeneità alla semina ha portato ad una densità di culmi fertili (e di produzione in risone) molto differente nelle diverse aree, comportando una distribuzione di frequenza delle produzioni leggermente più dispersa rispetto all'anno precedente e distribuita in maniera non normale (Fig. 14).

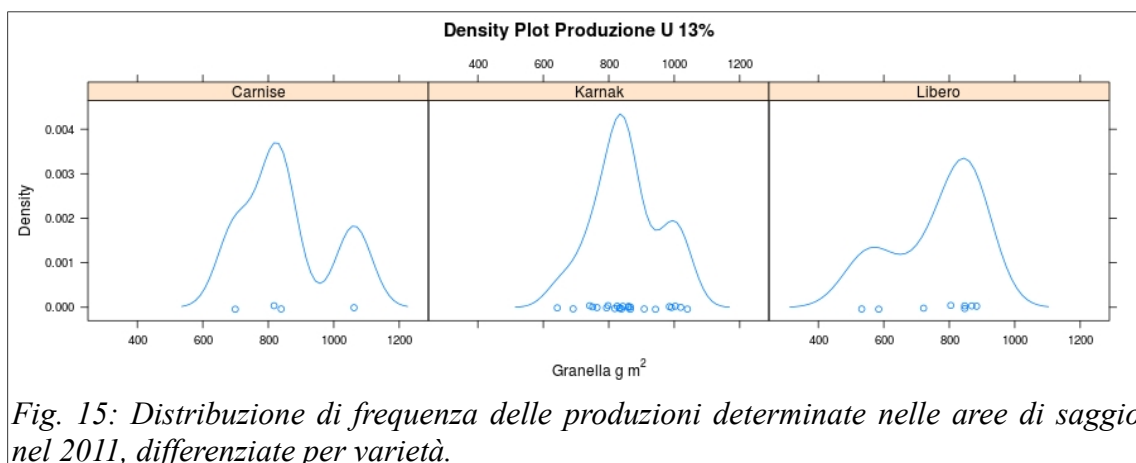


*Fig. 14: Distribuzione di frequenza delle produzioni determinate nelle aree di saggio nel 2011*

La distribuzione di frequenza dei dati aggregati di produzione, infatti, mostra una forte bimodalità e una distribuzione non normale delle osservazioni. Il test di omogeneità della varianza di Bartlett rispetto alle camere restituisce un *p-value* di 0.150 e rispetto

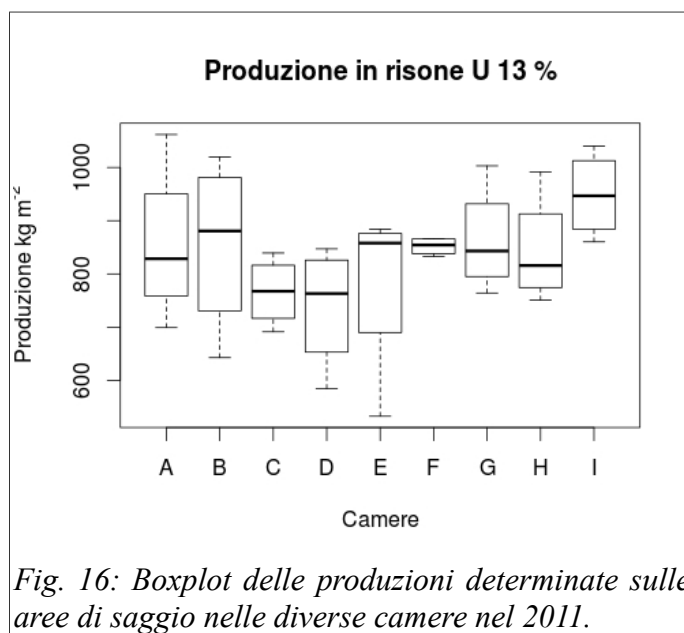
alla varietà un *p-value* di 0.504, pertanto non è possibile affermare che le varianze siano diverse da un punto di vista statistico.

L'analisi ANOVA della varianza rispetto alle varietà risulta ambigua, con un *p-value* pari a 0.084 (livello di  $\alpha = 0.91$ ), per cui, pur non potendo affermare che le medie delle varietà siano statisticamente differenti, si è scelto di effettuare alcune delle analisi a varietà separate.



*Fig. 15: Distribuzione di frequenza delle produzioni determinate nelle aree di saggio nel 2011, differenziate per varietà.*

La visualizzazione delle produzioni per camera rende più evidente le forti differenze in termini di risone prodotto, ma anche la distribuzione geograficamente casuale della variabilità (Fig. 15). La presenza di *boxplot* molto allungati sottolinea la presenza di punti con produzioni estreme sia in senso positivo che negativo nella stessa area (Fig. 16).



Le cause della forte disomogeneità all'emergenza sono da ricercarsi molto probabilmente sia in un movimento anomalo dell'acqua di sommersione al momento della semina che in un non ottimale funzionamento della seminatrice centrifuga che ha comportato una distribuzione graduale del seme nel senso trasversale. Ne risulta una ulteriore fonte di variabilità “a righe”, piuttosto evidente anche nella mappa di produzione. Il comportamento registrato nelle varietà Karnak e Carnise è stato piuttosto simile, sia in termini di culmi fertili (rispettivamente 504 - 455) che di culmi sterili (3 - 6). Forti differenze sono state riscontrate su Libero, varietà che tende ad accestire di più, che al momento della raccolta ha prodotto una media di 813 pannocchie fertili m<sup>-2</sup> e 48 pannocchie sterili. Le stesse pannocchie fertili in Libero presentavano un altissimo tasso di sterilità, determinato su 10 pannocchie per punto: a fronte delle 47.1 e 64.9 cariossidi fertili per pannocchia di Carnise e Karnak, Libero ne ha prodotto 54.6; la media delle cariossidi sterili è risultato 6.3 in Carnise, 7.4 in Karnak e 18.6 in Libero.

Da un punto di vista quantitativo, la produzione media di risone ad umidità del 13% determinata attraverso il campionamento manuale diretto è stata identica per Carnise e Karnak (rispettivamente 854.5 e 854.9 g m<sup>-2</sup>), mentre in Libero la media è stata 761.2 g m<sup>-2</sup>. L'elevata sterilità riscontrata nella varietà Libero potrebbe essere dovuta ad una

maggior sensibilità alle condizioni meteorologiche in fase riproduttiva, caratterizzata da forti escursioni termiche sia in fase di botticella (decade 67-77 DAS: min. 14.5 °C, max 30.0 °C, precipitazioni 7.6 mm) sia in fase di fecondazione (decade 88-98 DAS: min: 14.5, max.38.0).

Un altro fattore che ha inciso negativamente sulla performance produttiva di Libero è la tendenza a crodare più facilmente rispetto a Karnak e Carnise.

Le relazioni che intercorrono tra le variabili della produzione e le variabili vegetative spiegano l'importanza dell'uso degli indici spettrali durante la fase pre-riproduttiva della coltura, perchè permettono di indagare precocemente gli aspetti di crescita e sviluppo della pianta che incidono sulla capacità produttiva della pianta (Fig. 17).

Ammettendo che la variabile che più di tutte ha interferito con le misure spettrali è stata la difforme emergenza, è necessario capire in che termini questa ha inciso sulle componenti della produzione.

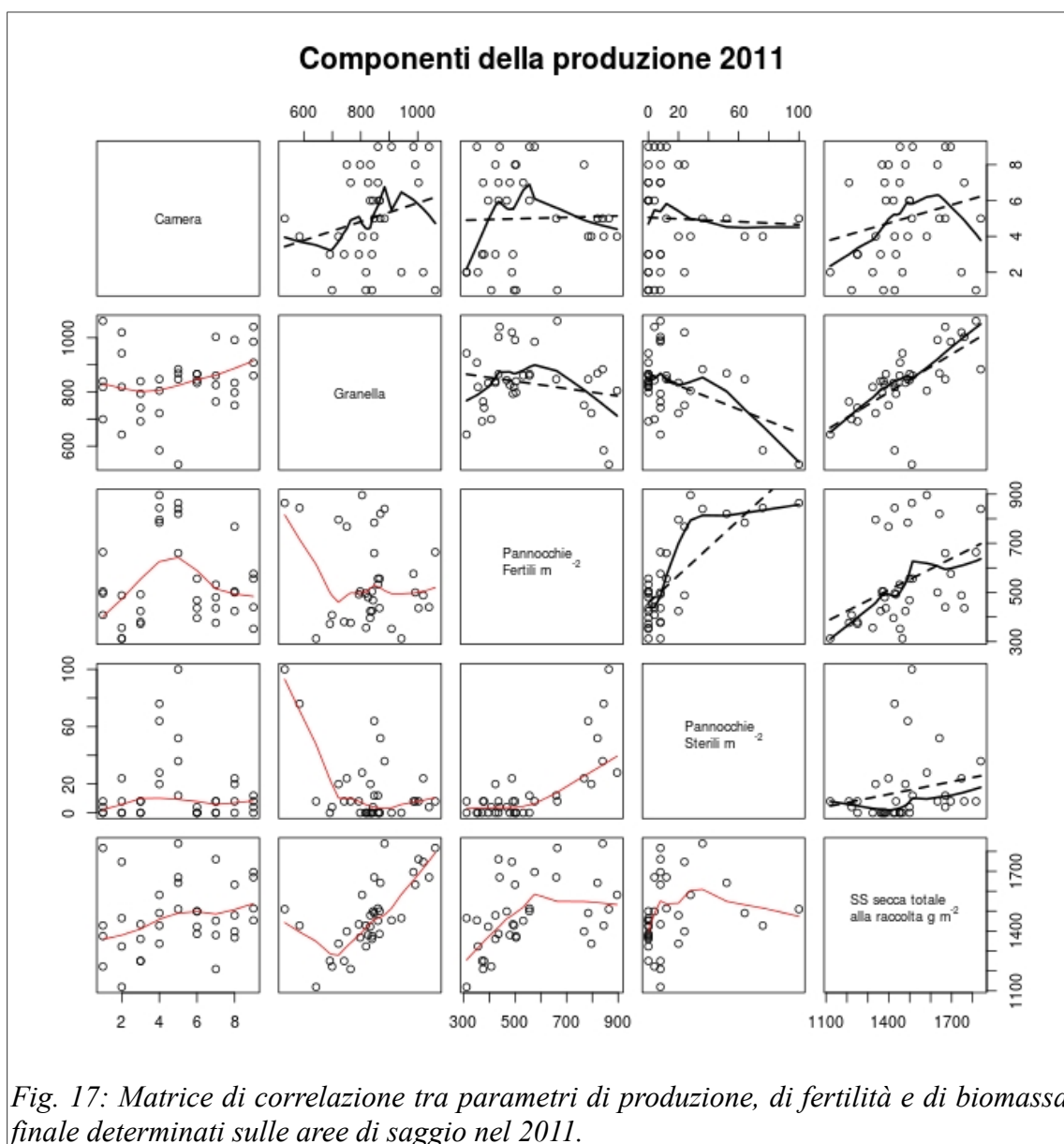
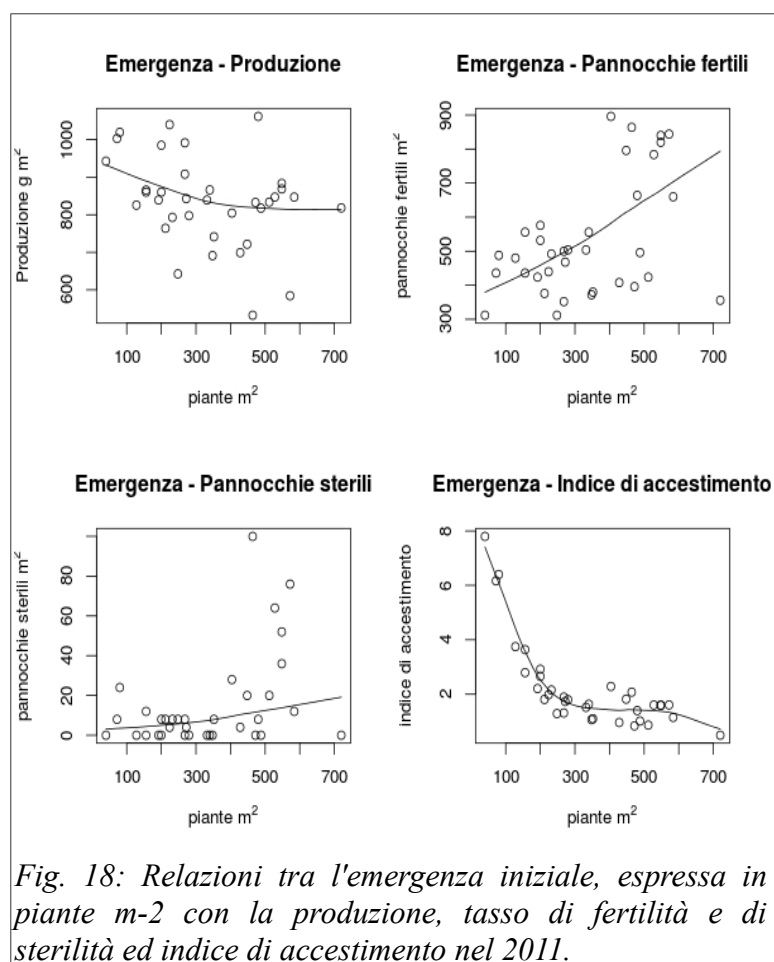


Fig. 17: Matrice di correlazione tra parametri di produzione, di fertilità e di biomassa finale determinati sulle aree di saggio nel 2011.

Confrontando l'emergenza (Fig. 18), espressa in piante emerse  $m^{-2}$  con la produzione in granella ( $R^2 = 0.126$ ), non emerge un trend evidente, mentre osservando il grado di fertilità e di sterilità delle pannocchie ( $R^2 = 0.229$  e  $0.180$ , rispettivamente) l'andamento, benchè molto sparso, sembrerebbe indicare un maggior numero di pannocchie fertili e sterili per unità di superficie, dovuto al fatto che le zone che hanno

avuto un maggior successo all'emergenza hanno portato a spigatura un maggior numero di culmi, salvo poi non riuscire a portarli tutti a maturazione. È però decisamente interessante notare il trend tra piante all'emergenza e indice di accestimento ( $R^2 = 0.513$ ), che sottolinea la forte risposta della pianta nelle zone di scarsa competizione, in particolare per valori di emergenza iniziale tra 0 e 350 piante  $m^{-2}$ .

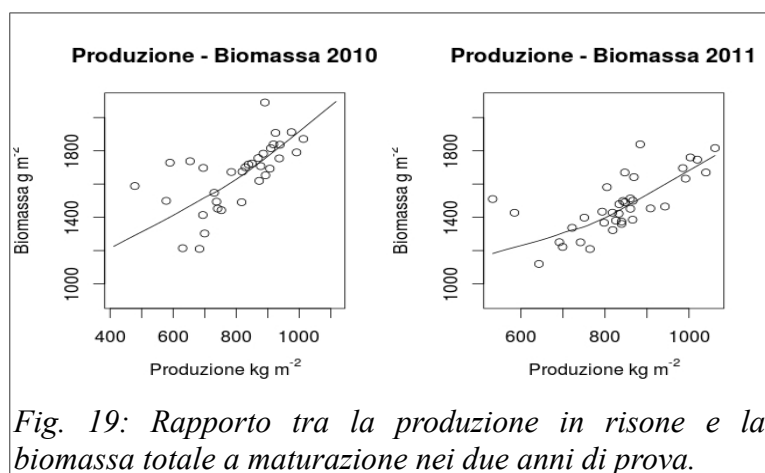
Intorno a tale valore è situato anche il flesso della produzione. Si noti il peso assunto sulla curva emergenza-sterilità dalla varietà Libero (il gruppo di punti valori intorno a  $x=450$ ). In questa elaborazione è stato rimosso il punto CHB30, che ha un numero di piante emerse  $m^{-2}$  quasi doppio rispetto al penultimo valore (720).



*Fig. 18: Relazioni tra l'emergenza iniziale, espressa in piante  $m^{-2}$  con la produzione, tasso di fertilità e di sterilità ed indice di accestimento nel 2011.*

La produzione in risone ha mostrato in entrambi gli anni forti correlazioni con la massa vegetale totale al momento della raccolta (0.768\*\* nel 2010, 0,686\*\* nel 2011;

\*\* = p-value < 0.001; \* = p-value < 0.005), evidenziando che le piante che hanno mostrato la migliore performance da un punto di vista morfologico sono state in grado di raggiungere sia una maggiore biomassa che una maggiore produzione (Fig. 19). La stima della resa potenziale in funzione della risposta spettrale della coltura si basa su questo assunto.



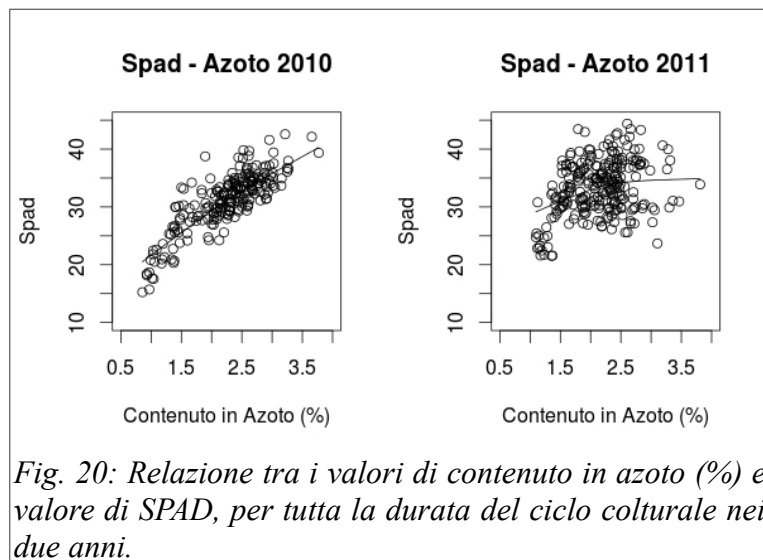
### 6.3 CONTENUTO E STIMA DELL'AZOTO

La relazione tra SPAD e contenuto in azoto sui dati aggregati si è dimostrata molto alta nel corso del 2010, ma non ha fornito risultati altrettanto attendibili nel 2011 (Tabella 4). Il valore di SPAD è una stima del contenuto in clorofilla nella foglia e generalmente presenta un'alta correlazione con il contenuto in azoto nella pianta, ma dal confronto dei due anni è evidente che questa relazione non è sempre verificata.

*Tabella 4: Indici di correlazione tra il valore di SPAD ed il contenuto di azoto nelle foglie e nella pianta (P) durante il ciclo colturale nei due anni di prova.*

DAS, 2010	46	64	78	92	106	120	-
	0.816**	0.792**	0.908**	0.7917**	0.651**	0.872**	-
DAS, 2011	37 (P)	51	65 (P)	79	94	107	122
	-0.300	0.324	0.606**	0.322	0.656**	0.587**	0.641**

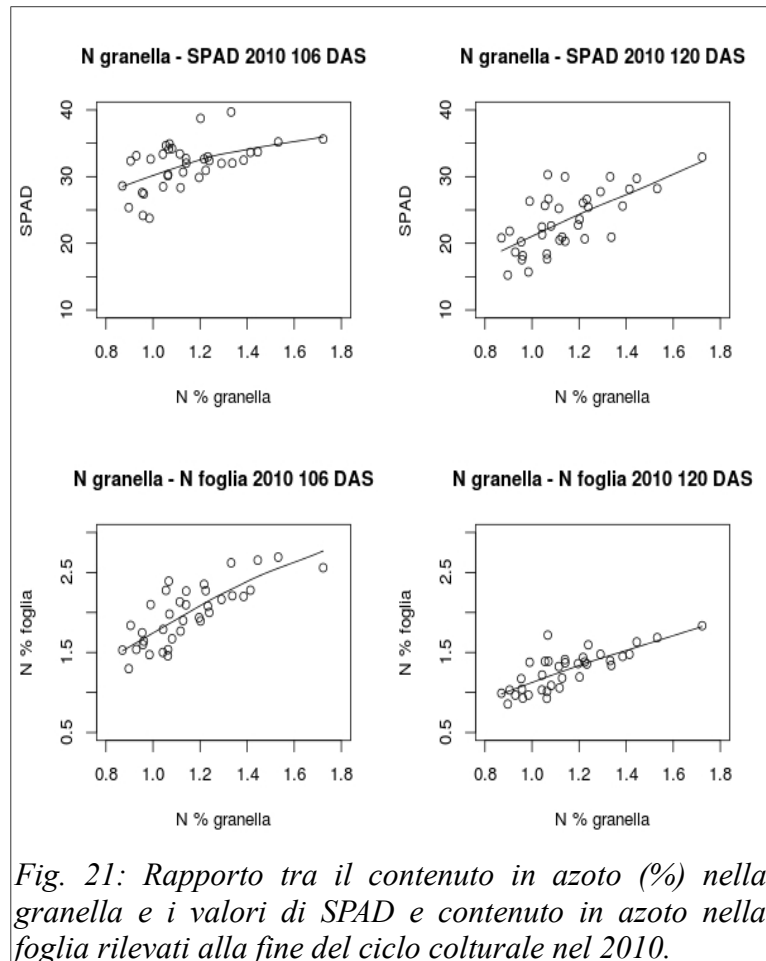
La relazione tra SPAD e contenuto in azoto nel 2011 è caratterizzata dall'assenza di un trend definito e da valori di SPAD generalmente più alti rispetto all'anno precedente. La covarianza registrata tra N e SPAD nel 2010 è 2.433, nel 2011 scende a 0.792 (Fig. 20).



In entrambi gli anni di prova, il contenuto in azoto della cariosside ha mostrato dipendere dalla quantità di azoto assorbita dalla pianta a partire dal periodo della fioritura (intorno a 90 DAS), che si rende disponibile per la traslocazione verso la pannocchia. Vista la relazione che intercorre tra il valore di SPAD e la quantità di azoto presente nei tessuti verdi, è possibile effettuare una previsione di massima del contenuto in azoto che avrà la cariosside al momento della maturazione, anche se la potenzialità predittiva della SPAD inizia ad essere altamente significativa leggermente in ritardo rispetto alla determinazione diretta dell'azoto (100-107 DAS). La relazione è stata ottenuta utilizzando il dato di N nella granella e nelle ultime 30 foglie completamente espanse.

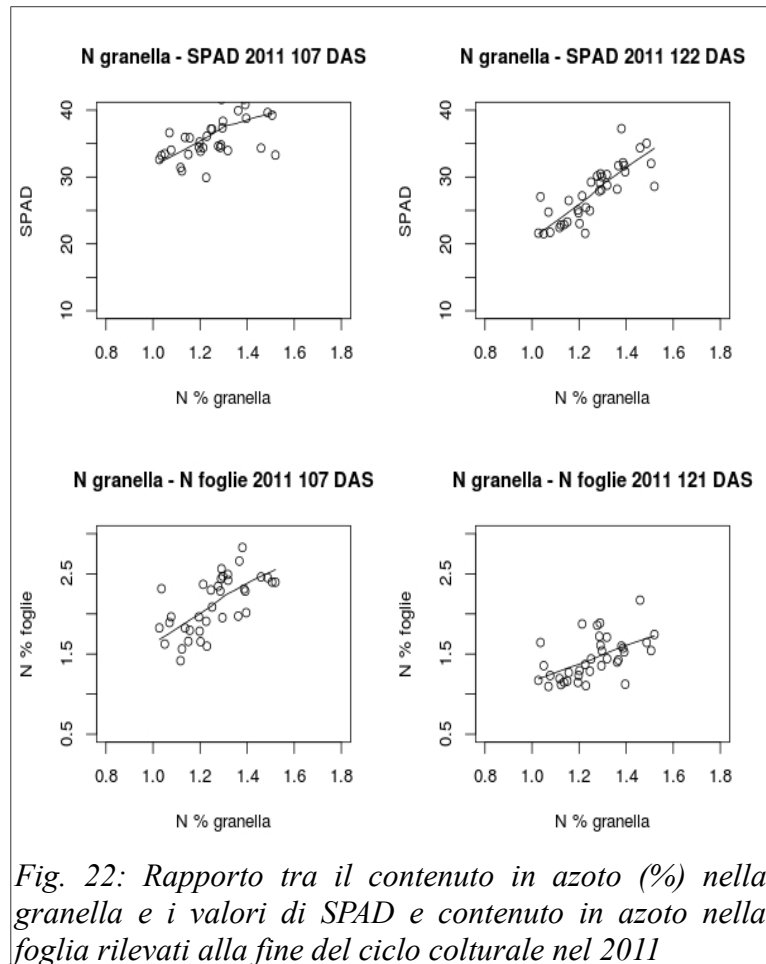
Il primo gruppo di grafici (Fig. 21) si riferisce al 2010 e mostra una distribuzione dei valori di azoto nella cariosside piuttosto lunga, con relazioni che si avvicinano alla linearità.





*Fig. 21: Rapporto tra il contenuto in azoto (%) nella granella e i valori di SPAD e contenuto in azoto nella foglia rilevati alla fine del ciclo colturale nel 2010.*

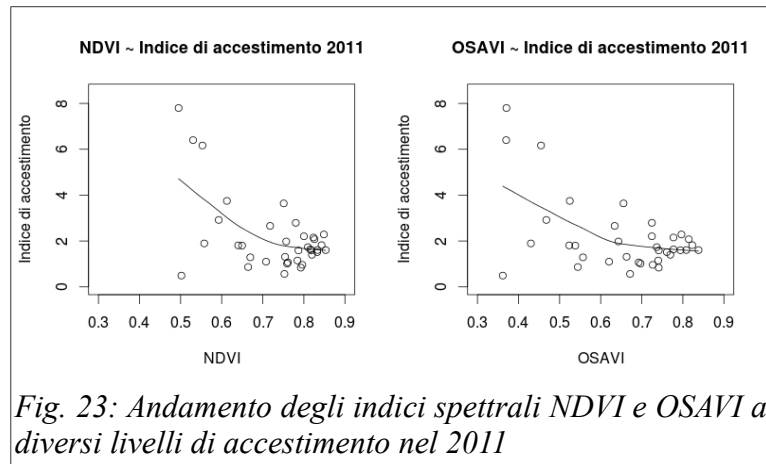
I grafici riferiti al 2011 (Fig. 22), evidenziano valori di azoto nella cariosside molto vicini, compresi in un range tra 1.0 e 1.6, espressi in termini percentuali. I valori di N e di SPAD appaiono del tutto simili, benchè le condizioni di densità e relativa competitività per l'azoto tra le piante fosse decisamente differente.



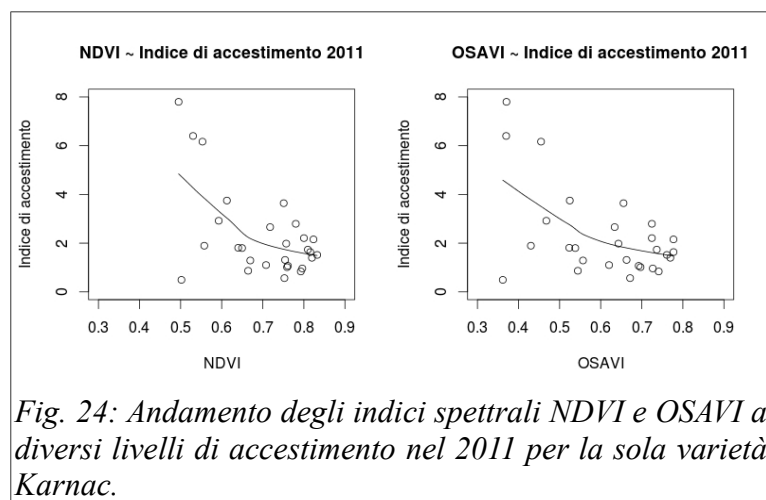
## 6.4 RADIOMETRIA IN CAMPO

### 6.4.1 INDICI SPETTRALI E INDICE DI ACCESTIMENTO

Gli effetti della difforme densità di semina (Fig. 23) rappresentano una variabile non prevista che però deve essere accuratamente valutata per comprendere l'influenza e il peso che possa aver ricoperto nella determinazione misura e stima delle altre variabili osservate. Le determinazioni effettuate nel corso del 2011, non rispondono alla condizione di parità di base, per cui è lecito aspettarsi che il numero di piante emerse abbia influito tanto sulle misure di tipo spettrale quanto sulle determinazioni svolte sui campioni prelevati.



Il primo rilievo FieldSpec del 2011 ha messo in evidenza una generale sensibilità di molti indici nello stimare l'indice di accestimento della coltura, fattore molto importante soprattutto in situazioni di grave disomogeneità come quella verificatasi in campo (Fig. 24). GNDVI\*, SAVI\*, OSAVI\*, NDVI\*\*, GEMI\*, e MTVI2\* hanno mostrato delle correlazioni negative significative. NDVI raggiunge un indice di correlazione di -0.539\*\*, OSAVI -0.508\*.

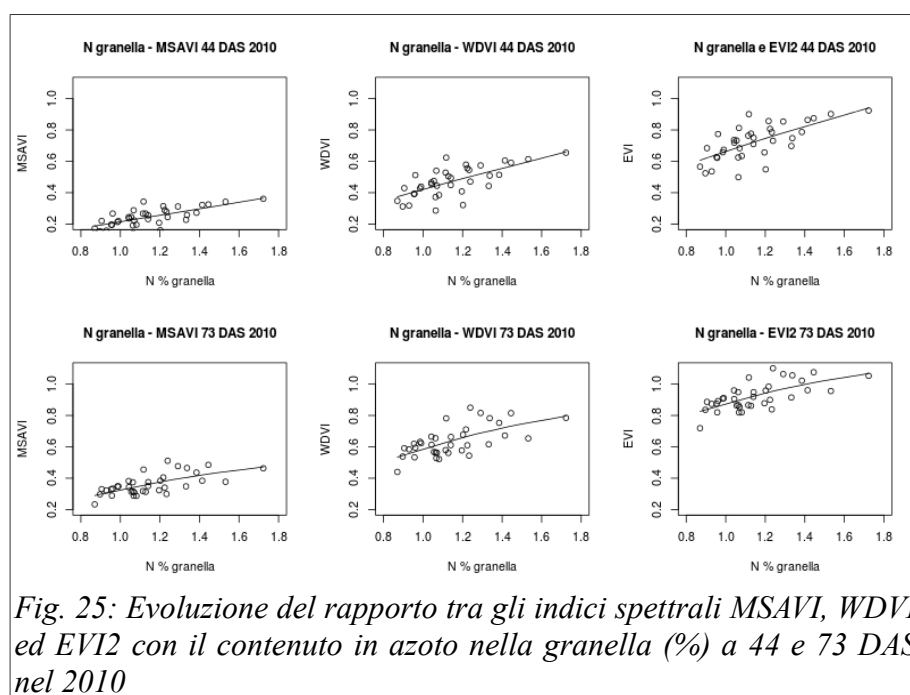


Focalizzando l'attenzione ai dati relativi alle varietà Karnak e Carnise, gli indici di correlazione risultano leggermente inferiori (NDVI - 0.530\*, OSAVI - 0.555\*), a sottolineare l'effetto della varietà Libero, la quale però, anche a causa della dimensione decisamente inferiore della popolazione, non risulta avere relazioni statisticamente significative. Dal confronto dei grafici, è possibile notare come i valori relativi alla

varietà Libero siano in gran parte concentrati intorno a valori di indice pari a 0.8 e indice di accestimento intorno a 2.

#### 6.4.2 INDICI SPETTRALI E IL CONTENUTO IN AZOTO NELLA GRANELLA

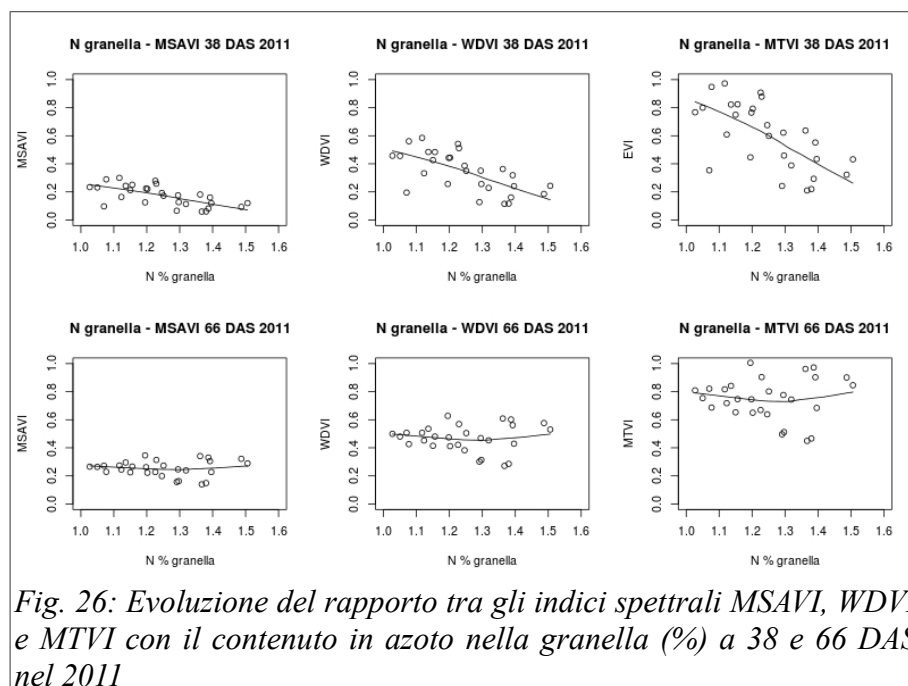
Nel primo anno, tutti gli indici FS utilizzati hanno mostrato valori di correlazione molto alti nei confronti del contenuto in azoto della granella (Fig. 25), in entrambi i rilievi in particolare MSAVI, WdVI e EVI2 (0.707\*\*, 0.687\*\*, 0.686\*\* nel primo rilievo, 0.653\*\*, 0.635\*\*, 0.664\*\* nel secondo).



*Fig. 25: Evoluzione del rapporto tra gli indici spettrali MSAVI, WdVI ed EVI2 con il contenuto in azoto nella granella (%) a 44 e 73 DAS nel 2010*

Escludendo la varietà Volano dall'analisi, le correlazioni per gli stessi indici tendono ad aumentare (0.749\*\*, 0.643\*\*, 0.679\*\*).

Inspiegabilmente, nel 2011 non sono presenti relazioni significative tra indici FS e contenuto in azoto, se non sul primo rilievo e limitatamente alle varietà Karnak e Carnise (Fig. 26).



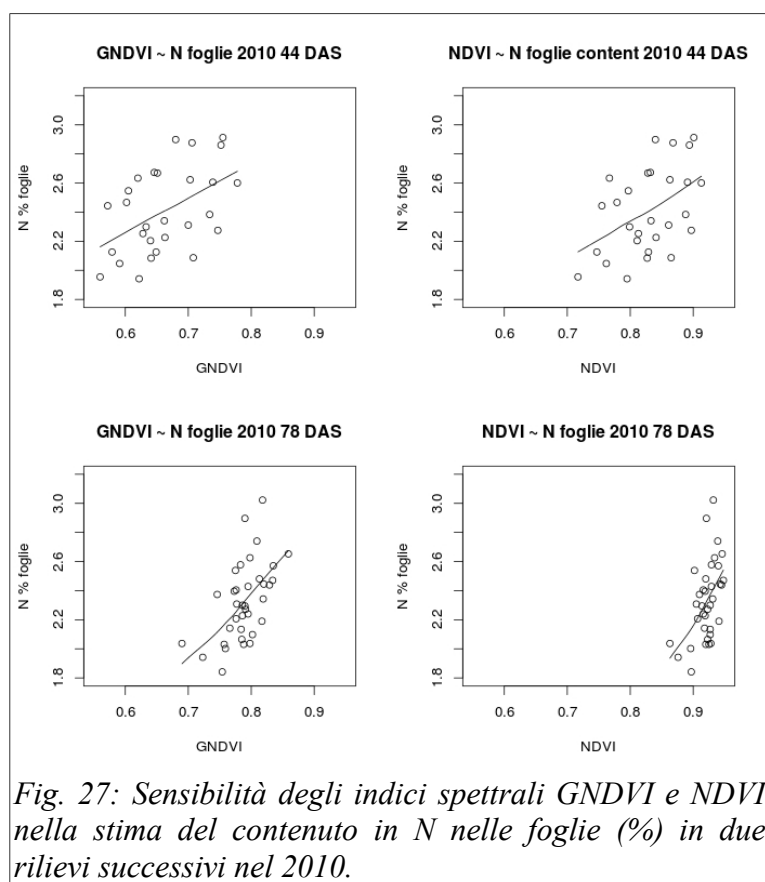
Le correlazioni, anche abbastanza elevate, sono di segno negativo per tutti gli indici, in particolare in grafico MSAVI, WDWI e MTVI (-0.640\*\*, -0.640\*\*, -0.644\*\*). Libero è stata oggetto di interventi di diserbo il 37 DAS, per cui è ragionevole che la risposta spettrale possa essere stata distorta.

Nella seconda data del 2011 non si sono registrate relazioni significative.

#### 6.4.3 INDICI SPETTRALI E IL CONTENUTO IN AZOTO NELLA PIANTA

Attraverso i rilievi spettrali Fieldspec è stata riscontrata una relazione positiva tra due degli indici spettrali e il contenuto in azoto delle ultime 30 foglie completamente espanse. Nel primo rilievo, la relazione sussiste unicamente sulla varietà Karnac (GNDVI 0.494, NDVI 0.482, p-value < 0.01), mentre nessun rapporto significativo è stato registrato sulla varietà Volano. Nel corso del secondo rilievo, la relazione tra GNDVI e NDVI con il contenuto in azoto cresce anche per la varietà Volano, pur non raggiungendo la soglia di significatività; la correlazione è però significativa sia per il *dataset* aggregato (Fig. 27) (senza differenziare per varietà), sia sulla sola varietà

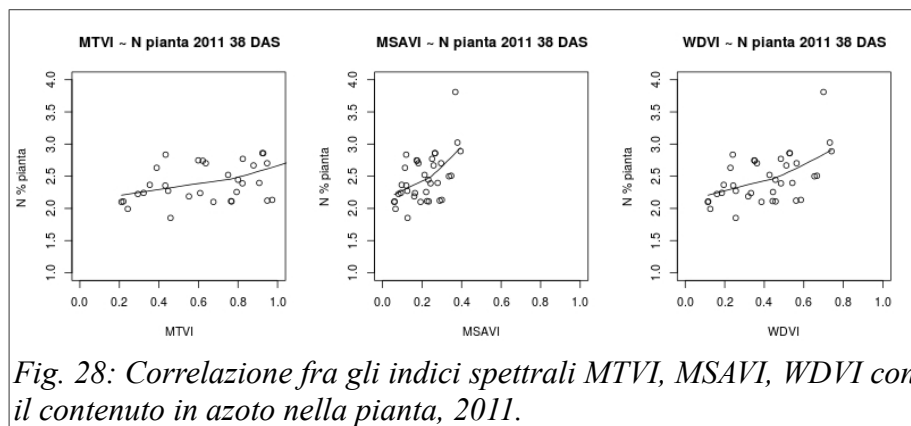
Karnak (intero campo: GNDVI 0.548\*\*, NDVI 0.504\*; varietà Karnak: GNDVI 0.695\*\*, NDVI 0.557\*).



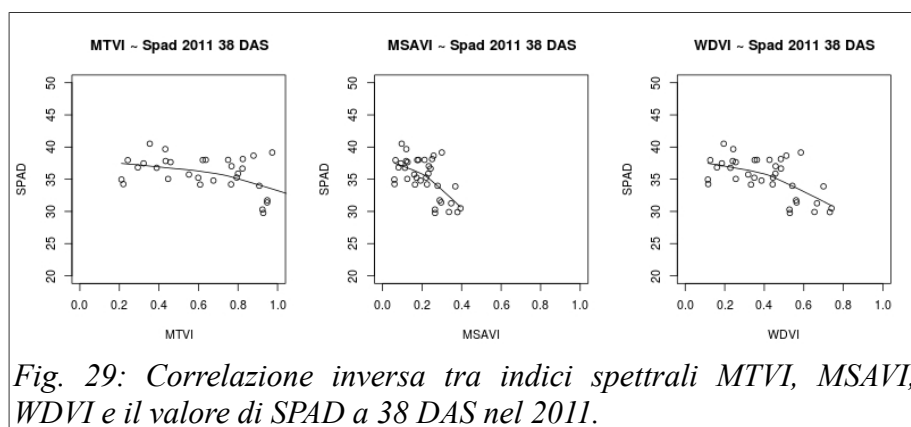
*Fig. 27: Sensibilità degli indici spettrali GNDVI e NDVI nella stima del contenuto in N nelle foglie (%) in due rilievi successivi nel 2010.*

Nonostante SPAD e contenuto in azoto nelle foglie abbiano presentato durante l'intera stagione indici di correlazione oscillati tra 0.55 e 0.90, sono emerse relazioni significative tra FS e SPAD soltanto fra GNDVI (78 DAS) e SPAD (73 DAS) nella sola varietà Karnak (0.613\*\*).

Nel 2011 la risposta spettrale rispetto al contenuto in azoto della pianta è stata decisamente migliore per quanto riguarda il primo dei rilievi effettuati: tutti gli indici spettrali calcolati a partire dai dati di riflettanza FieldSpec si sono dimostrati correlati con il contenuto in azoto della pianta (Fig. 28), con diversi livelli di significatività, in particolare WdVI 0.533\*\*, MSAVI 0.537\*\*, MTVI 0.536\*\*.



Nello stesso rilievo si è registrata una dinamica imprevista in cui tutti gli indici calcolati hanno mostrato delle correlazioni consistenti ma di segno opposto con il valore di SPAD attraverso il quale si sarebbe dovuta effettuare la stima del contenuto in clorofilla; nel corso dei primi rilievi del 2011, contrariamente a quanto accaduto nell'anno precedente, non è stata registrata correlazione alcuna tra SPAD e contenuto in azoto della pianta, fatto evidenziato dal cambio di segno tra le relazioni indici-SPAD e Indici-Azoto (Fig. 29); dalla pendenza delle curve di approssimazione degli stessi indici (WDVI,  $-0.596^{**}$ , MSAVI  $-0.602^{**}$ , MTVI  $-0.603^{**}$ ), si potrebbe affermare che il contenuto in azoto della pianta e il contenuto in clorofilla siano inversamente proporzionali.



Si è notato, inoltre, che gli indici relativamente più fortemente correlati nel primo rilievo 2010 (GNDVI e NDVI), sono gli stessi che sono risultati i più deboli nel 2011.

#### 6.4.4 INDICI SPETTRALI E PARAMETRI VEGETAZIONALI

Nel 2010 e 2011, oltre il LAI, sono stati utilizzati due diversi parametri per lo studio della capacità di stima degli indici spettrali nei confronti della copertura vegetale. Nel 2010 è stata calcolata la variabile ALA (*Average Leaf Area*) sulla base della media delle superfici delle ultime trenta foglie completamente espanse, mentre nel 2011 si è ritenuto più corretto utilizzare una misura che tenesse in adeguata considerazione anche le strutture verticali della coltura, e si è preferito utilizzare il peso secco delle piante intere prelevato su una superficie nota come riferimento per la valutazione del funzionamento degli indici spettrali (Tabella 5).

*Tabella 5: Indici di correlazione tra gli indici spettrali e i parametri di biomassa nei due anni di prova.*

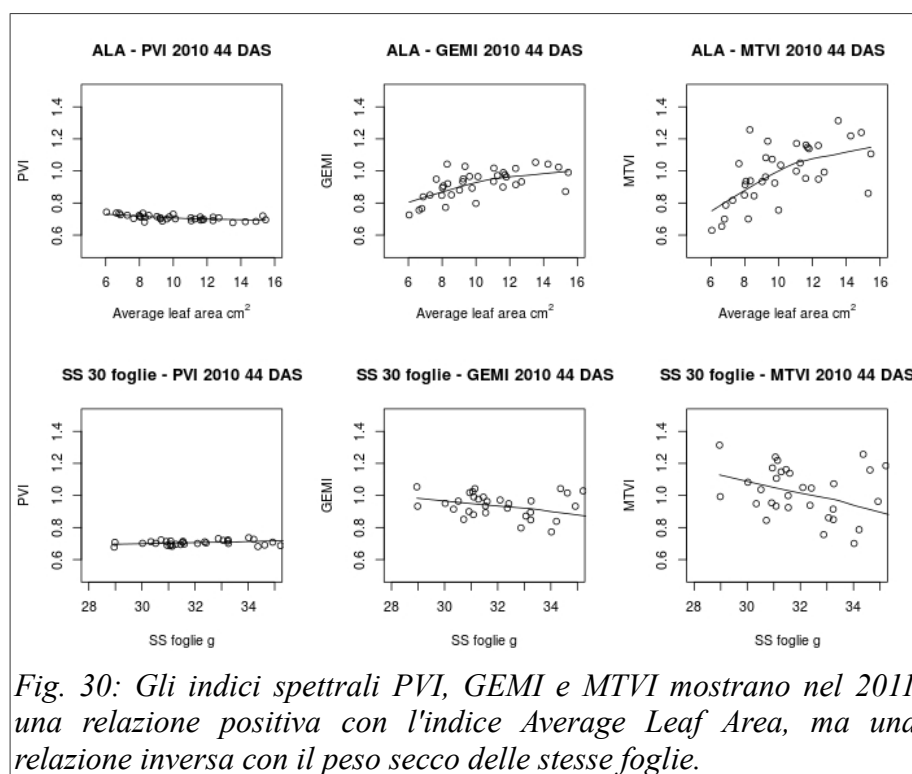
Indice	WDVI	GNDVI	PVI	SAVI	OSAVI	MSAVI	EVI	EVI2	GEMI	NDVI	MTVI	MTVI2
2010 (44 DAS), ALA	0.613**	0.511*	-0.615**	0.608**	0.584**	0.601**	0.607**	0.607**	0.615**	0.523*	0.615**	0.596**
2011 (37 DAS) Plant g m <sup>-2</sup>	0.790**	0.746**	-0.804**	0.816**	0.817**	0.780**	0.803**	0.818**	0.810**	0.820**	0.796**	0.821**

La risposta degli indici è stata sostanzialmente sovrapponibile nei due anni, e ha mostrato una grande capacità di tutti gli indici nella stima della massa vegetale presente nel primo rilievo, per poi decrescere drasticamente nel secondo, in particolare nel 2011.

Nel 2010 si è ipotizzato che la dimensione delle foglie potesse essere utilizzato come variabile di stima della dimensione della pianta; nel 2011, si è preferito misurare direttamente la biomassa delle piante intere campionate su una superficie nota. La relazione tra il parametro ALA (definito come superficie media delle ultime trenta foglie completamente espanse) e tre degli indici che meglio stimano il suo andamento nel primo rilievo del 2010 mostrano un andamento positivo (PVI, GEMI e MTVI

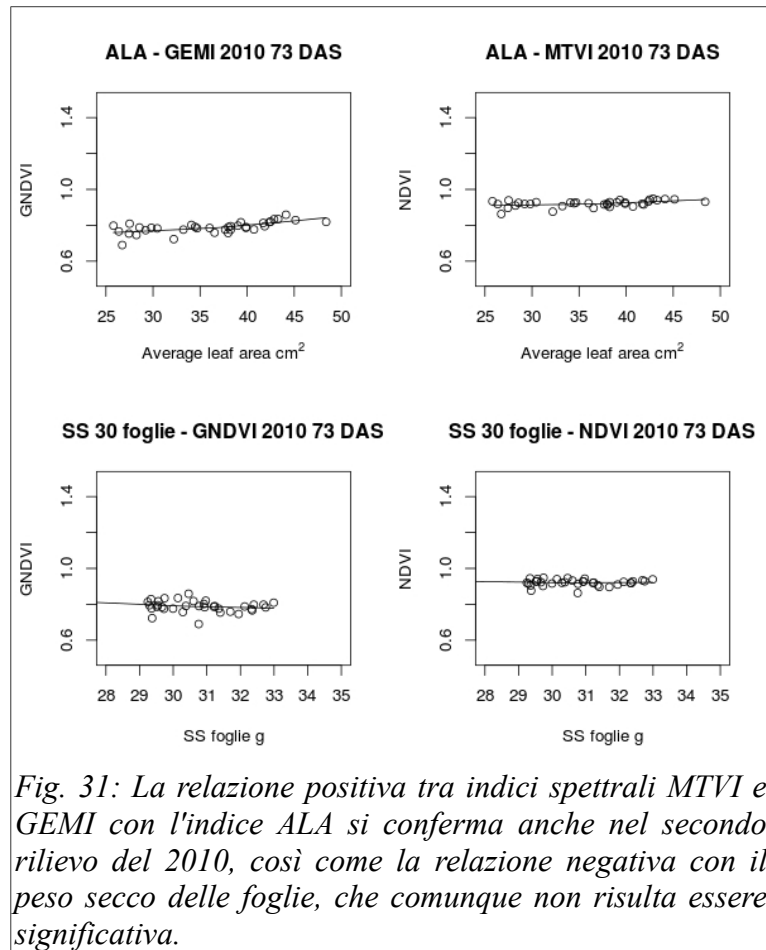


-0.615\*\*, 0.615\*\*, 0.615\*\*), ma esiste una relazione inversa tra gli stessi indici e il peso secco delle stesse trenta foglie (Fig. 30).

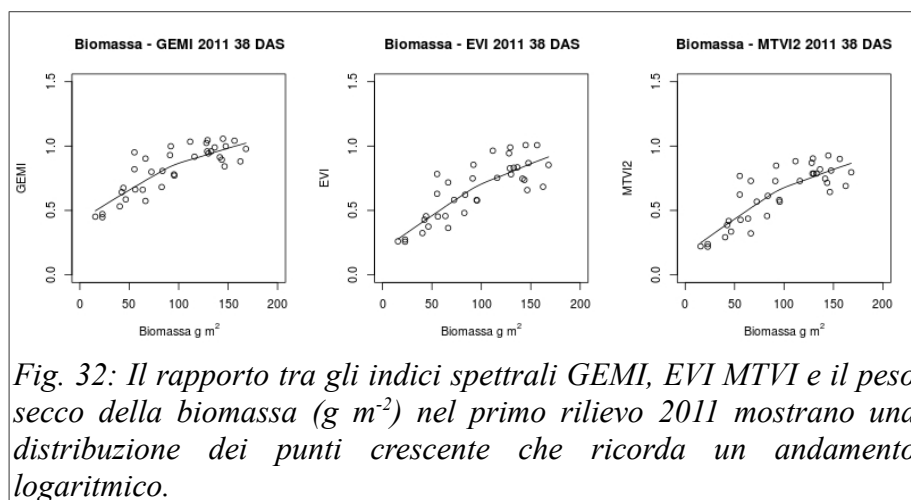


*Fig. 30: Gli indici spettrali PVI, GEMI e MTVI mostrano nel 2011 una relazione positiva con l'indice Average Leaf Area, ma una relazione inversa con il peso secco delle stesse foglie.*

Il secondo rilievo 2010 mostra correlazioni decisamente più deboli (GNDVI 0.632\*\*, NDVI 0.436 al limite della significatività, Fig. 31) che ancora una volta tendono a salire limitando l'analisi alla sola varietà Karnak (GNDVI 0.734\*\*, NDVI 0.646\*\*). Le relazioni che intercorrono tra i valori degli indici spettrali e il peso secco delle foglie sulla quale è stata determinata la superficie, pur non essendo significative, risultano tutte negative sia su tutte le varietà sia sul solo Karnak. Il rapporto inverso tra superficie media e sostanza secca delle foglie potrebbe essere dovuto al diverso rapporto tra tessuti vascolari (più pesanti) rispetto ai tessuti parenchimatici aeriferi, accentuato dalla struttura parallelinervia della foglia del riso.



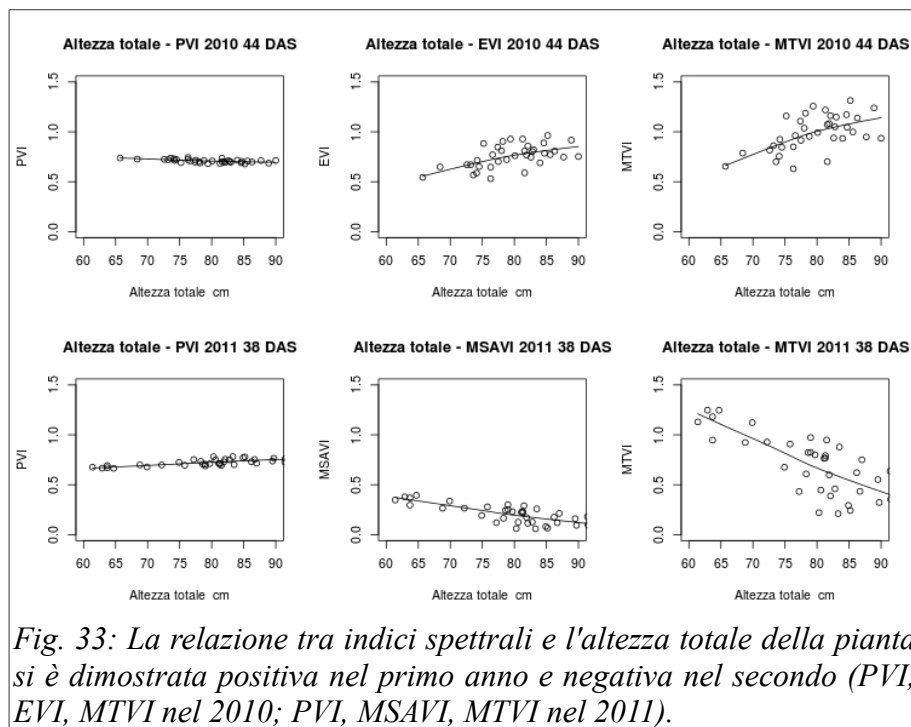
Nel 2011, utilizzando il valore dell'intera biomassa per unità di superficie invece che indici basati sulle sole foglie (Fig. 31), le correlazioni con gli indici si dimostrano molto affidabili, almeno per quanto riguarda la prima fase (indici più rappresentativi a 38 DAS: OSAVI 0.817\*\*\*, GEMI 0.820\*\*\*, EVI 0.818\*\*\*, MTVI2 0.821\*\* ), mentre non si sono registrate significative relazioni sul secondo periodo; gli indici spettrali sulla varietà Libero analizzata separatamente non rispondono in nessuna delle due date, per cui la relazione è tutta dovuta a Karnak e a Carnise, che infatti, analizzati a parte, presentano indici di correlazione con valori molto simili (0.802\*\*, 0.818\*\*, 0.804\*\*, 0.810\*\* sugli stessi indici).



Da segnalare che non si sono riscontrate relazioni significative con la biomassa nel secondo rilievo 2011 (65 DAS), ma si è notato che, mettendo in relazione la prima misura utile della sostanza secca delle ultime 30 foglie completamente espanse (Indici 38 DAS - foglie 51 DAS; indici 66 DAS - foglie 79 DAS) la relazione inversa, seppur non significativa, si ripete anche nel secondo anno. La distanza cronologica tra le due misure ha indubbiamente influito sulla significatività delle relazioni; rimane da capire il motivo per cui a foglie più pesanti corrispondano valori di indice inferiori.

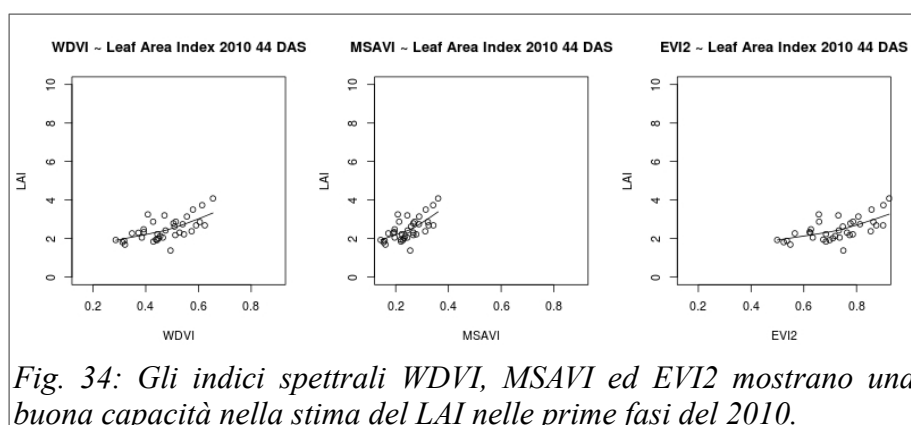
Può essere interessante notare come l'inversione del segno della correlazione che abbiamo visto nella parte relativa al rapporto tra gli indici e il contenuto in azoto della granella si ripeta anche nel caso di una variabile di tipo “vegetativo”, quale l'altezza totale della pianta.

Ancora più interessante può essere il fatto che in entrambi gli anni, se si fa un'analisi di correlazione a varietà separate, non emerge nessun rapporto tra altezza della pianta e indici, per nessuna varietà e per nessuna data; le correlazioni anche consistenti, appaiono soltanto sul *database* completo (PVI -0.540\*\*, EVI 0.551\*\*, MTVI 0.573\*\* per il 2010; PVI 0.720\*\*, MSAVI -0.757\*\*, MTVI -0.745 per il 2011, Fig. 33).



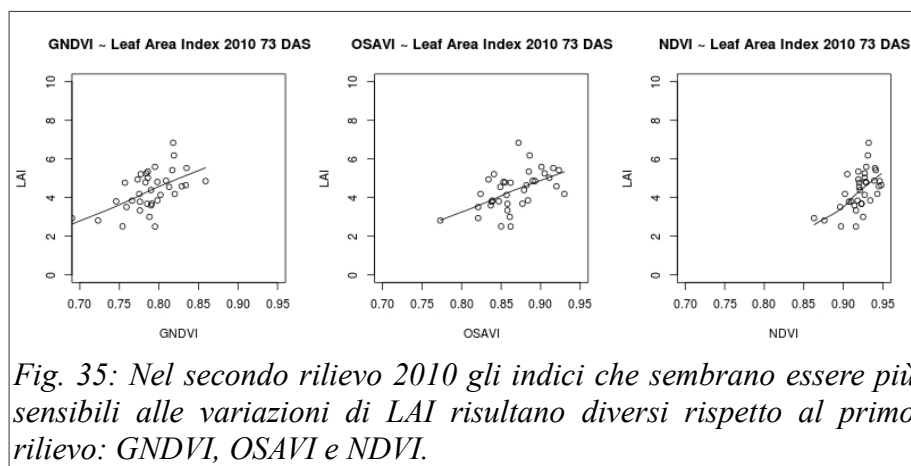
#### 6.4.5 INDICI SPETTRALI E LAI

Il primo anno di prova è caratterizzato da una buona capacità di stima degli indici nei confronti del LAI in entrambe le date di misura, anche se gli indici che rispondono meglio nel primo periodo (Fig. 34) non si confermano altrettanto stabili nel secondo e viceversa.



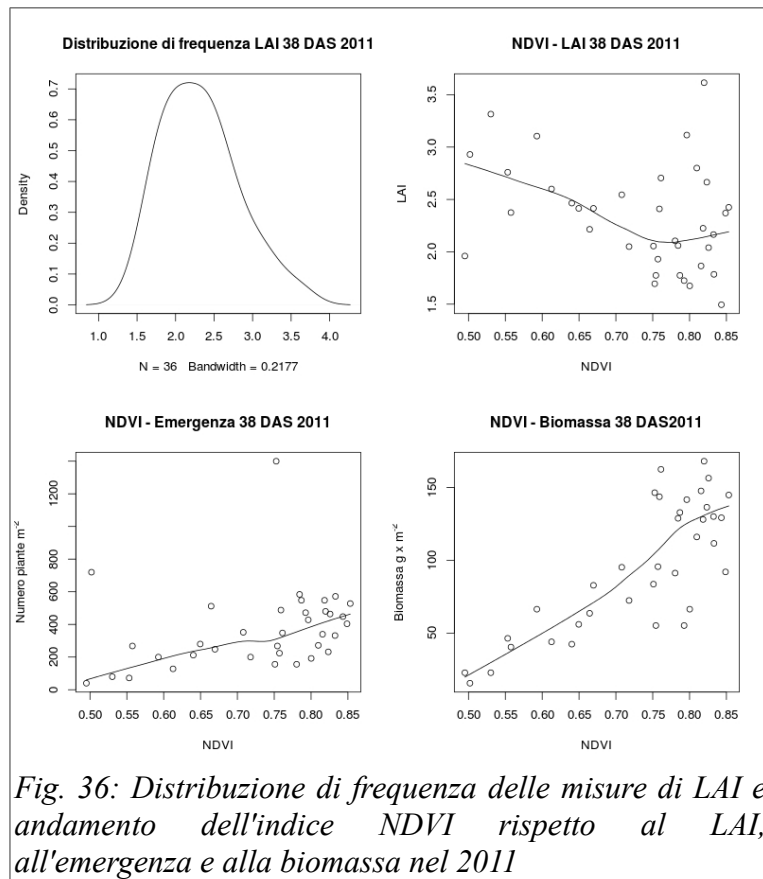
Gli indici più rappresentativi nella fase iniziale sono stati WDVI (0.626\*\*), PVI (-0.614\*\*), MSAVI (0.642\*\*), EVI2 (0.621\*\*), ma anche tutti gli altri indici calcolati hanno evidenziato correlazioni tutte altamente significative.

Nel corso del secondo rilievo (Fig. 35), gli indici più significativi sono stati GNDVI (0.544\*\*), OSAVI (0.526\*\*), NDVI (0.567\*\*), MTVI2 (0.504\*), con soli due indici con un  $p$ -value > 0.01. Generalmente, si è osservata compressione della distribuzione dei valori degli indici in un range molto ridotto di valori rispetto a quanto osservato nel primo rilievo.



*Fig. 35: Nel secondo rilievo 2010 gli indici che sembrano essere più sensibili alle variazioni di LAI risultano diversi rispetto al primo rilievo: GNDVI, OSAVI e NDVI.*

Il primo rilievo del 2011, con ogni probabilità a causa della difforme densità di semina, non mostra relazioni dirette evidenti tra indici e LAI, poichè sia gli indici spettrali che la superficie fogliare sono fortemente influenzati più dal grado di competizione tra le singole piante che da un normale stadio di sviluppo e crescita della pianta (Fig. 36).



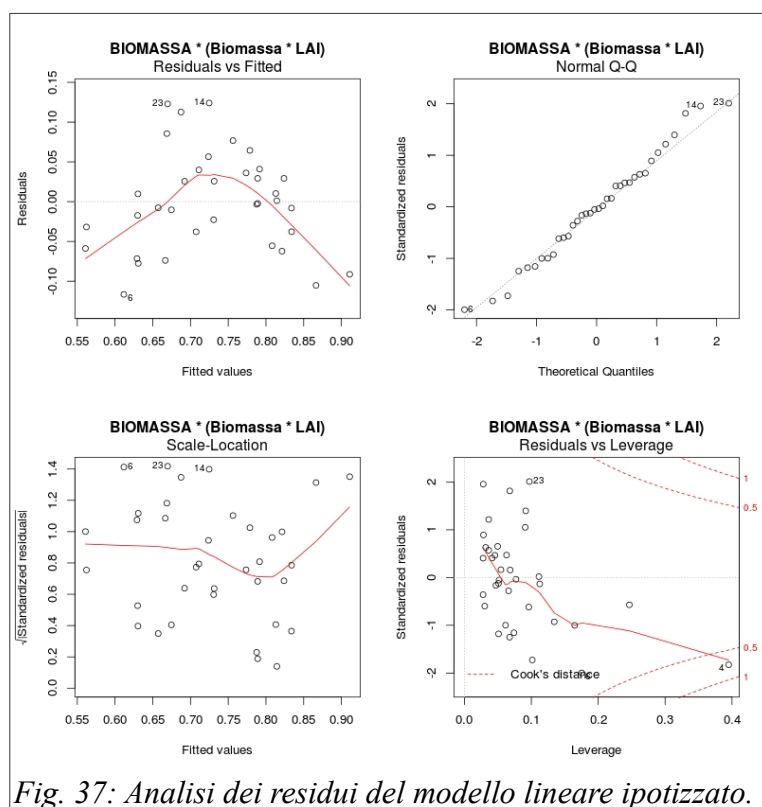
Per cercare di dare una spiegazione alla mancata stima del LAI da parte degli indici spettrali, tenendo in opportuna considerazione l'effetto distorsivo della densità di semina sulla risposta spettrale rispetto al LAI, si è cercato di valutare l'effetto dell'azione congiunta dell'emergenza e della relativa quantità di biomassa prodotta dalla pianta. Utilizzando i valori normalizzati rispetto alla media delle variabili 'LAI', 'densità delle piante emerse per unità di superficie' e 'biomassa prodotta dalla coltura per ciascun punto di campionamento', sono stati elaborati dei modelli lineari con tutti i possibili incroci tra variabili e interazioni tra variabili, allo scopo di verificare se la mancata corrispondenza tra la variabile misurata (LAI) e misura di stima campione (NDVI) fosse realmente dovuta all'anomala distribuzione della coltura nello spazio.

Il modello, supposto lineare, si basa sull'ipotesi che la densità di piante determini un diverso grado di competizione nelle diverse zone, comportando un diverso rapporto tra dimensione delle foglie e numero dei palchi (maggior numero di culmi, piante

“sfilate”, foglie più piccole), per cui la risposta spettrale rispetto al LAI risulta inquinata dalla struttura nelle tre dimensioni della copertura vegetale.

Sulla base dei diversi test effettuati, il modello lineare che sembrerebbe statisticamente più valido è quello che contiene nella sua formulazione il termine “Biomassa” e il termine “Interazione”, a sua volta calcolato come interazione delle variabili “Biomassa” e ”LAI”, normalizzate ciascuna sulla base della propria media per limitare effetti di autocollinearità:

$$NDVI38DAS = BIOMASSA + (Biomassa\ Normalizzata * LAI\ Normalizzato)$$



L'analisi dei residui mostra un'alta significatività del modello (Fig. 37, Tabella 6). I coefficienti assegnano la significatività più alta alla variabile 'biomassa', ovviamente a causa del rapporto, già visto, tra gli indici e la quantità di sostanza secca per unità di superficie. La significatività del modello, però, risulta molto più alta indicando che con

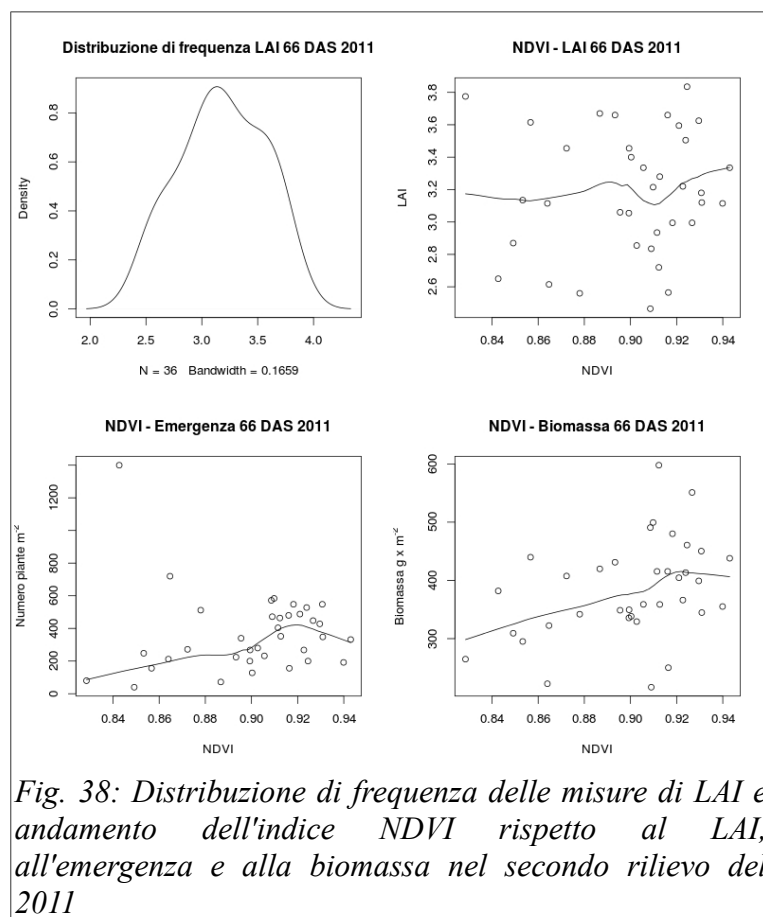
ogni probabilità il fattore che tende a confondere la stima dell'indice spettrale risiede proprio nell'effetto combinato del rapporto tra biomassa e superficie fogliare. Il termine 'interazione' (Biomassa x LAI), che aggiunge il gap di significatività al modello, di per sé parrebbe non avere una significatività propria. In condizioni di omogeneità, è ragionevole pensare che ad ogni livello di accrescimento della coltura corrisponda un valore di LAI più o meno costante; nel caso pratico, però questa situazione non si è verificata.

*Tabella 6: Analisi dei residui del modello lineare ipotizzato*

lm(formula = NDVI ~ Plantg m <sup>-2</sup> + Interazione (Biomassa * LAI))				
Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.116560	-0.042255	-0.002738	0.037072	0.124023
Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.5567268	0.0267186	20.837	< 2 e <sup>-16</sup> ***
Plant g m <sup>-2</sup>	0.0018275	0.0002548	7.174	3.2 e <sup>-08</sup> ***
Interazione3	0.0005036	0.0004239	1.188	0.243
---				
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.06431 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.6592, Adjusted R-squared: 0.6385				
F-statistic: 31.91 on 2 and 33 DF, p-value: 1.934e-08				

Anche nel successivo rilievo 2011 (Fig. 38) si è registrata la stessa dinamica e si è tentato di utilizzare lo stesso tipo di modello lineare.





Se, come per il primo rilievo, si cerca di trovare una ragione specifica per questo comportamento anomalo, verificando la validità statistica di tutte le combinazioni delle tre variabili considerate (Emergenza, LAI e Biomassa), il modello statisticamente più valido è quello che contiene al suo interno il termine Biomassa e l'interazione tra la biomassa e il LAI; a differenza del primo rilievo, il termine più significativo è l'interazione tra LAI ed emergenza (Fig. 39, Tabella 7).

Il fatto che l'indice NDVI nel secondo rilievo non abbia fornito relazioni significative con nessuna di queste tre variabili, ma mostra di dipendere dall'effetto congiunto, mette in evidenza quanto possa essere determinante l'omogeneità della coltura anche nell'uso corretto degli indici spettrali.

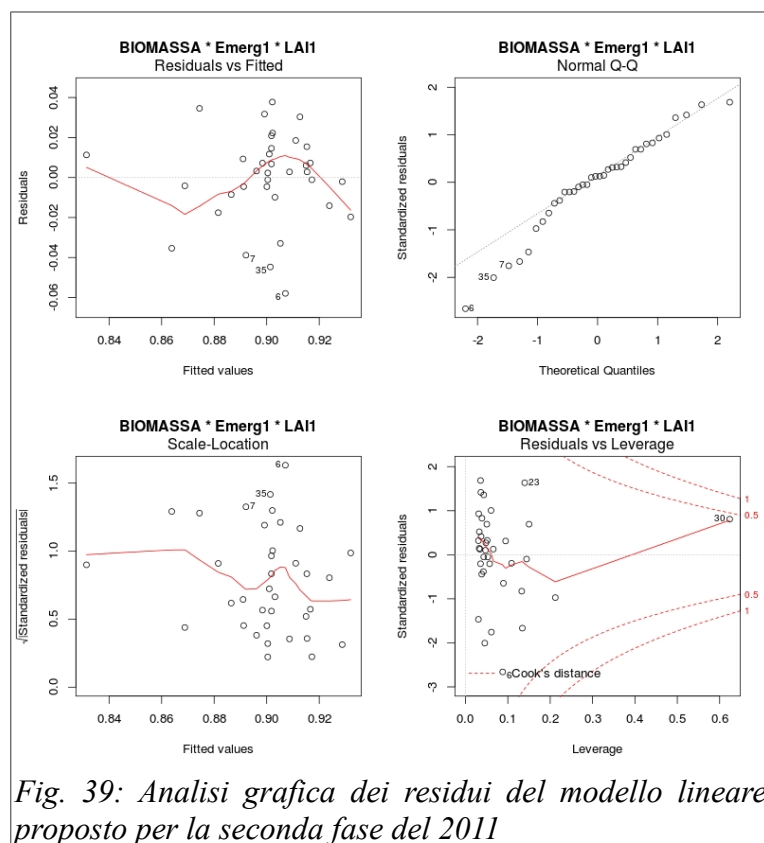
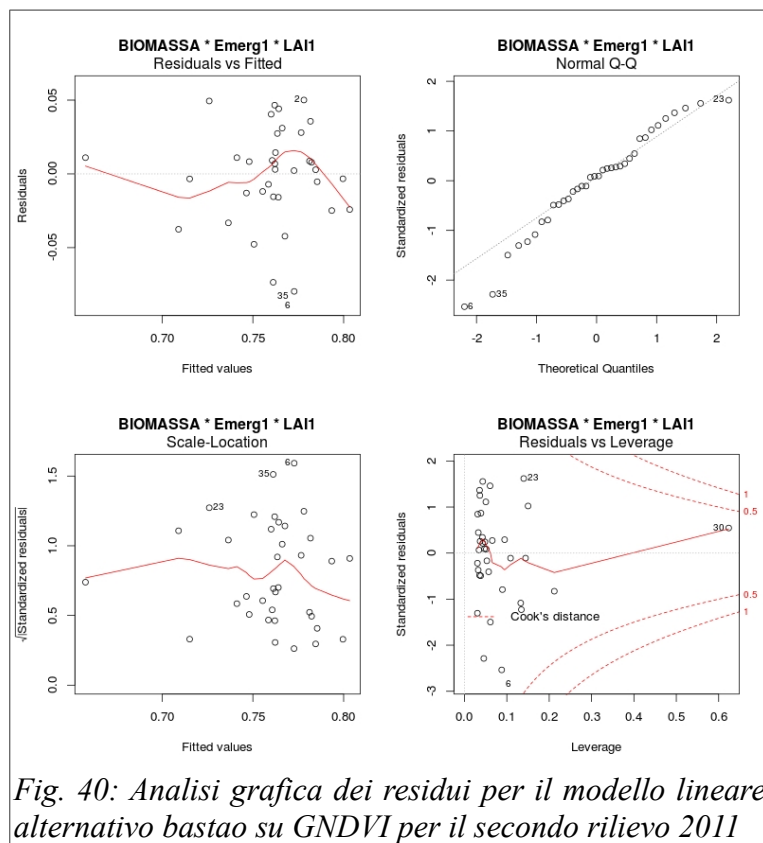


Tabella 7: Analisi numerica dei residui e della significatività del modello ipotizzato per il secondi rilievo 2011

lm(formula = NDVI ~ Plant g m <sup>-2</sup> + Interazione (Emergenza * LAI)				
Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.057918	-0.008851	0.002819	0.012437	0.037757
Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	8.459 e <sup>-01</sup>	1.789 e <sup>-02</sup>	47.293	< 2 e <sup>-16</sup> ***
Plant_g_m2_65DAS	1.540 e <sup>-04</sup>	4.577 e <sup>-05</sup>	3.364	0.001961 **
Interazione11	1.340 e <sup>-04</sup>	3.449 e <sup>-05</sup>	3.885	0.000466 ***
---				
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.02281 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.4224, Adjusted R-squared: 0.3874				
F-statistic: 12.07 on 2 and 33 DF, p-value: 0.0001165				

Come si può vedere dalla distribuzione di frequenza, il LAI 66 DAS è intorno al valore 3, per cui si può ipotizzare che l'indice NDVI, almeno in alcuni punti, possa essere già saturato. Prendendo in considerazione un indice basato sulla riflettanza nel verde, meno soggetto a saturazione per elevati valori di LAI (GNDVI), si ottengono modelli lineari decisamente differenti (Fig. 40, Tabella 8):



In questo caso le variabili che sono risultate più significative sono l'Emergenza e l'interazione tra l'Emergenza ed il LAI. Si noti che la formulazione più significativa è la stessa sia per NDVI che per GNDVI, a conferma di un effetto importante, da studiare più approfonditamente, tra i parametri di volume e di superficie della coltura.

Tabella 8: Analisi numerica dei residui e della significatività per il modello lineare alternativo basato su GNDVI per il secondo rilievo 2011

lm(formula = GNDVI66DAS ~ Plant g m <sup>-2</sup> + Interazione (Emergenza*LAI))				
Residuals:				
Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.079666	-0.015590	0.002917	0.017686	0.050088
Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	6.883 e <sup>-01</sup>	2.580 e <sup>-02</sup>	26.678	< 2 e <sup>-16</sup> ***
Plant_g_m2_65DAS	2.074 e <sup>-04</sup>	6.602 e <sup>-05</sup>	3.141	0.003539 **
Interazione11	2.005 e <sup>-04</sup>	4.975 e <sup>-05</sup>	4.030	0.000309 ***
---				
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				
Residual standard error: 0.0329 on 33 degrees of freedom				
Multiple R-squared: 0.4202, Adjusted R-squared: 0.3851				
F-statistic: 11.96 on 2 and 33 DF, p-value: 0.0001242				

Nello studio dei modelli di tutte le possibili combinazioni tra LAI biomassa, Emergenza e relative interazioni, le combinazioni più significative sono state quelle che contenevano il termine di interazione tra emergenza e LAI.

La validità statistica dei modelli elaborati non è e non può essere completamente esplicativa del rapporto che intercorre tra spettro riflesso e caratteristiche vegetazionali perchè non è detto che la relazione sia realmente lineare e perchè altri fattori esterni potrebbero ricoprire un ruolo importante nella composizione dello spettro; con tutti i limiti del caso, però, la modellizzazione può fornire importanti informazioni sulla opportunità di poter utilizzare alcuni tipi di indici in situazioni limite, non infrequenti nel caso reale a scala di campo, caratterizzate da fattori che influenzano fortemente e in maniera negativa l'attendibilità del dato stimato.

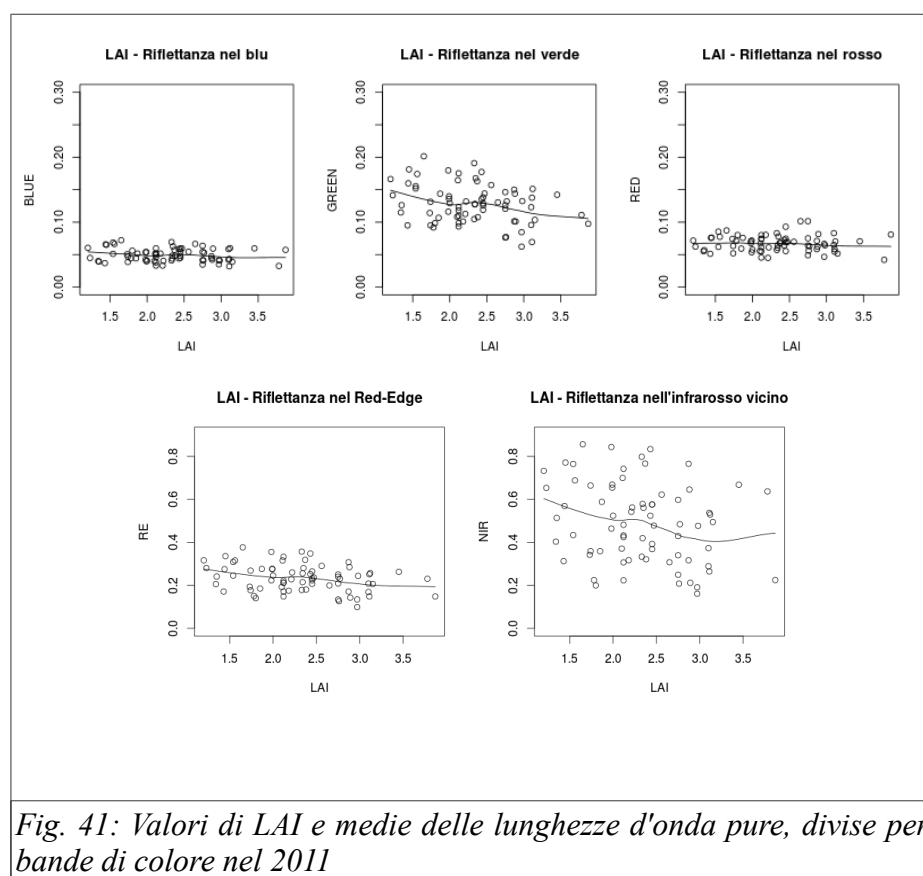
## 6.5 CARATTERIZZAZIONE DELLE BANDE PURE

Analizzando le bande pure aggregate dei primi due rilievi 2011 (Fig. 41) emerge che la riflettanza media nelle bande di assorbimento visibili (blu e rosso) è scarsa, mentre

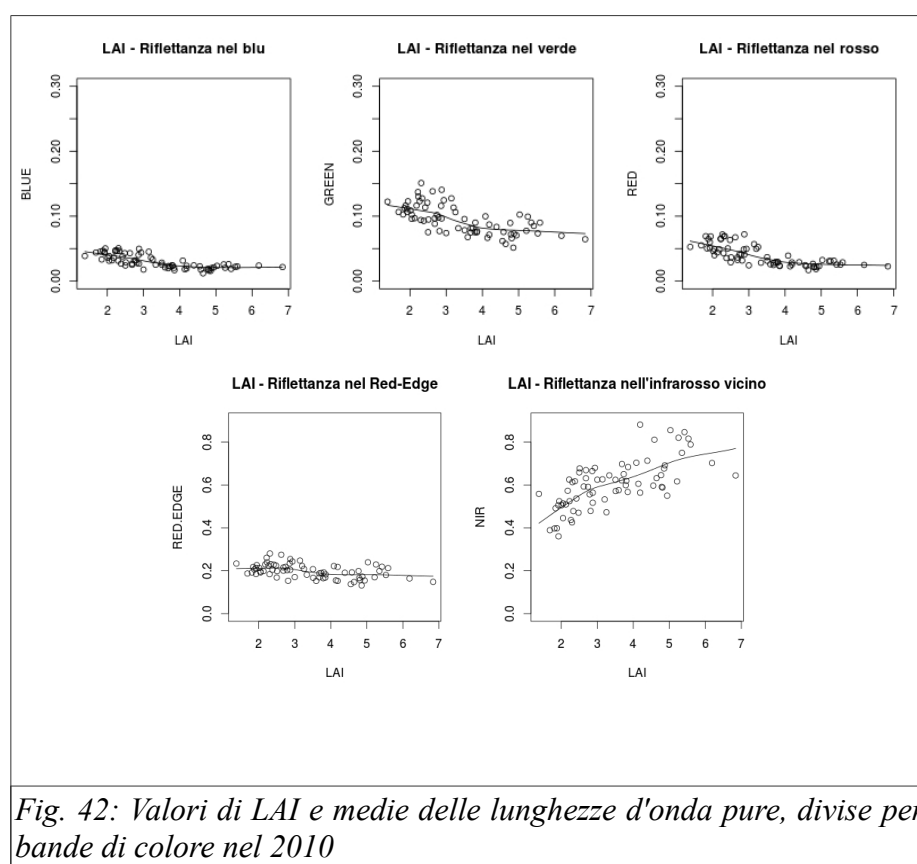
risulta piuttosto alta la riflettanza nel *red-edge* ma soprattutto nel vicino infrarosso, in particolare per bassi valori di LAI (Wang, 2007).

Su tutte le bande si osserva che la riflettanza tende a diminuire al crescere dei valori di LAI, seppur con andamenti leggermente differenti: l'aumento del valore di LAI comporta una bassa riduzione della riflettanza delle regioni visibili, poichè la sovrapposizione dei palchi fogliari comporta una graduale diminuzione della radiazione incidente dall'alto verso il basso e una maggiore interferenza della riflessione della radiazione ricevuta da parte della pianta.

L'andamento orizzontale della linea di riflettanza del rosso e l'alta dispersione dei punti del NIR spiega perchè l'indice NDVI non ha dato risposte significative nel secondo anno di prova.



Nel 2010 il rapporto tra il LAI e le bande spettrali misurate è decisamente più marcato, e denota una rapida decrescita dei valori di riflettanza al crescere del LAI, per valori inferiori a 4; per valori maggiori, la tendenza assume un andamento orizzontale (Fig. 42). La dispersione è essenzialmente la stessa tra i due anni, con nuvole di punti molto compresse nel blu e nel rosso e relativamente disperse nel verde e nell'infrarosso. Il trend è sicuramente più compatibile con una distribuzione più omogenea delle foglie sulla superficie del campo. Il comportamento della banda del NIR tra i due anni è completamente diverso: assume un andamento crescente al crescere del LAI nel 2010 e un trend decrescente nel 2011 e denota una relazione diretta tra la riflettanza nel campo del vicino infrarosso e il LAI.



*Fig. 42: Valori di LAI e medie delle lunghezze d'onda pure, divise per bande di colore nel 2010*

## 6.6 TELERILEVAMENTO SATELLITARE

Il telerilevamento satellitare ha consentito di avere a disposizione dati relativi all'intera superficie del campo, in forma non puntuale (Fig. 43 e in Appendice, tavole VIII-XII). La prima immagine del 2010 (47 DAS) mette in evidenza una variabilità spaziale molto forte, con valori di NDVI compresi in un range decisamente ampio (0.11 - 0.7) e la variabilità risulta distribuita più fra le camere che entro camera. L'immagine è stata acquisita 8 giorni dopo le operazioni di diserbo, e verosimilmente le aree che mostrano valori di NDVI più bassi sono quelli nelle quali insiste la maggior densità di infestanti e che al momento del rilievo mostravano segni di disseccamento. In particolare nella camera E vi è una zona che mostra valori eccezionalmente bassi dovuti alla forte presenza di infestanti. I valori più elevati sono stati osservati nella camera A. 10 giorni dopo il rilievo è stata eseguita una concimazione in copertura e l'effetto è molto evidente nella seconda immagine (91 DAS): mentre nel primo rilievo si trovano valori di sei classi di NDVI (dal verde al giallo) nel secondo si osserva una generalizzata crescita dei valori di NDVI e una forte contrazione della variabilità, con sole quattro classi rappresentate. Il secondo rilievo corrisponde anche alla fase di maggiore vigore vegetativo della coltura; l'immagine del 15 agosto mostra valori di NDVI generalmente stabili o in leggera diminuzione, con l'eccezione della camera E e della camera B. L'ultimo rilievo del 2010 mette in evidenza una più rapida entrata in senescenza delle piante nelle camere D ed E (varietà Volano) rispetto alla media, ma mostra una distribuzione delle aree estremamente simile al 15 agosto. Si è osservata la presenza di un'area nel settore W della camera A che ha mostrato valori di NDVI sistematicamente più elevati della media.

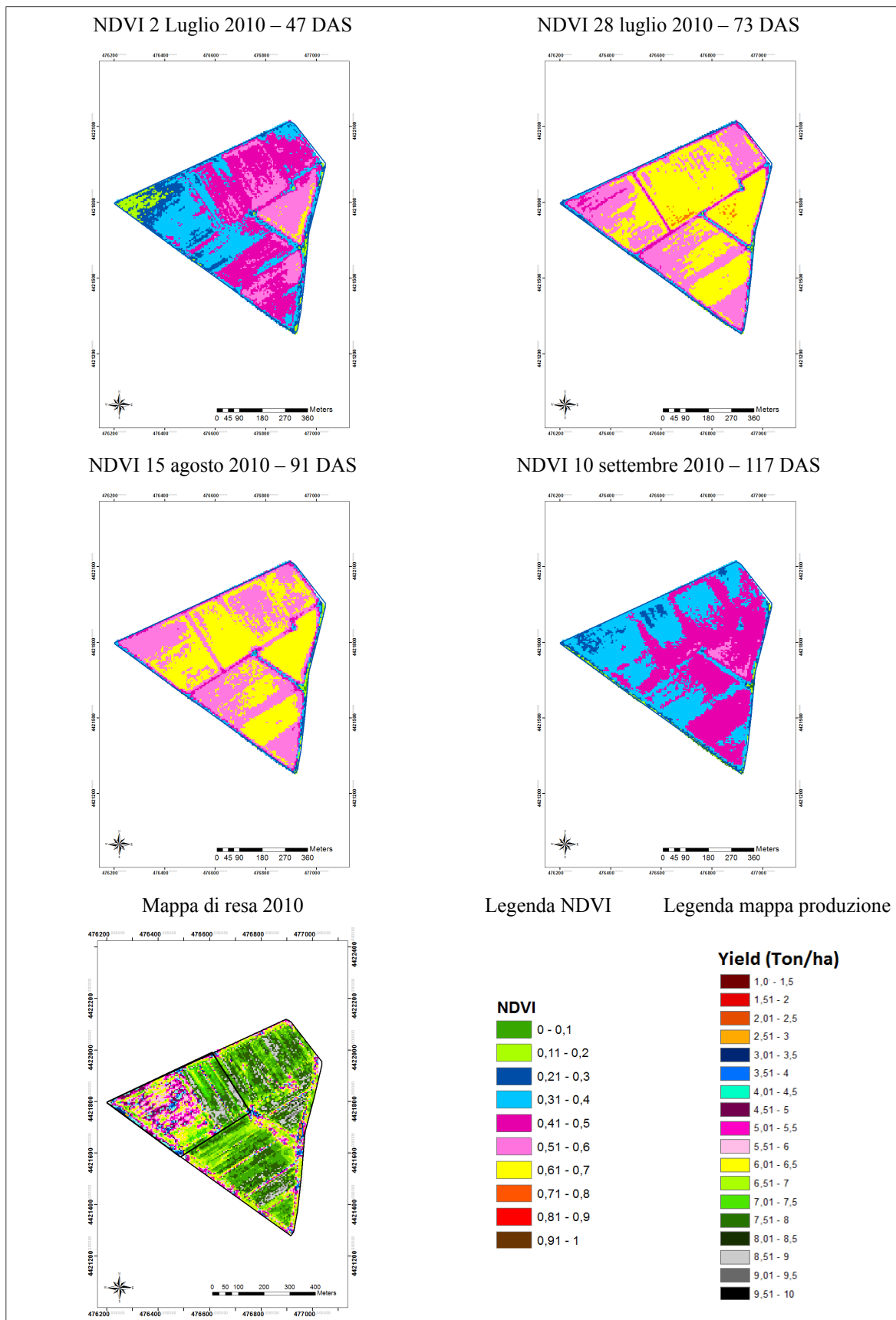


Fig. 43: Immagini satellitari (RapidEye) dell'area di studio, riportanti i valori del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) messe a confronto con la mappa delle rese 2010.



Nel 2011 i rilievi satellitari sono stati infittiti nelle prime fasi del ciclo colturale, ritenute maggiormente informative (Fig. 44, in Appendice Tavole XII - XVIII). Come nell'anno precedente, il primo rilievo (43 DAS) evidenzia una elevata variabilità spaziale, con 5 classi di NDVI rappresentate.

La varietà Libero (Camere D ed E) evidenzia i valori maggiori di NDVI, nonostante abbia subito un intervento di diserbo 6 giorni prima (37 DAS). La coltura non evidenzia segnali di stress e nel complesso appare piuttosto omogenea.

Tra la prima e la seconda immagine (52 DAS) è stato eseguito un diserbo anche sulle varietà Karnak e Carnise (44 DAS) che invece hanno mostrato forti segnali di stress, con riduzioni dei valori di NDVI anche molto accentuate (camere B, C, F e G) in particolare nelle zone più periferiche, con l'eccezione delle camere A e I (53 DAS). La riduzione dei valori di NDVI è dovuta in parte al disseccamento delle infestanti ed in parte alla reazione della pianta del riso al contatto con il principio attivo. L'effetto congiunto del diserbo e del progressivo consumo di azoto continua a mostrare segnali evidenti anche nelle camere D e E.

L'effetto della concimazione in copertura, effettuato in 52 DAS non è uguale in tutte le parti del campo (immagine 63 DAS). Alcune camere (B, H, I) sembrano rispondere in maniera più lenta o meno intensa rispetto alle camere A e C, che mostrano forti incrementi nel valore di NDVI.

Il rilievo successivo (75 DAS) ha l'aspetto di una normale evoluzione della coltura e non evidenzia aspetti particolari. Alcune fra le aree che apparivano compromesse a seguito del diserbo continuano a mostrare valori modesti di NDVI, mentre è da segnalare la notevole ripresa vegetativa delle camere H e I.

Nel rilievo effettuato a 98 DAS iniziano ad essere evidenti i primi segni di progressiva senescenza della pianta, in particolare per quanto riguarda il Karnak e Carnise, ad eccezione della camera F e H.

Come l'anno precedente la camera A evidenzia la presenza di punti sporadici apparentemente differenti dal resto della camera.

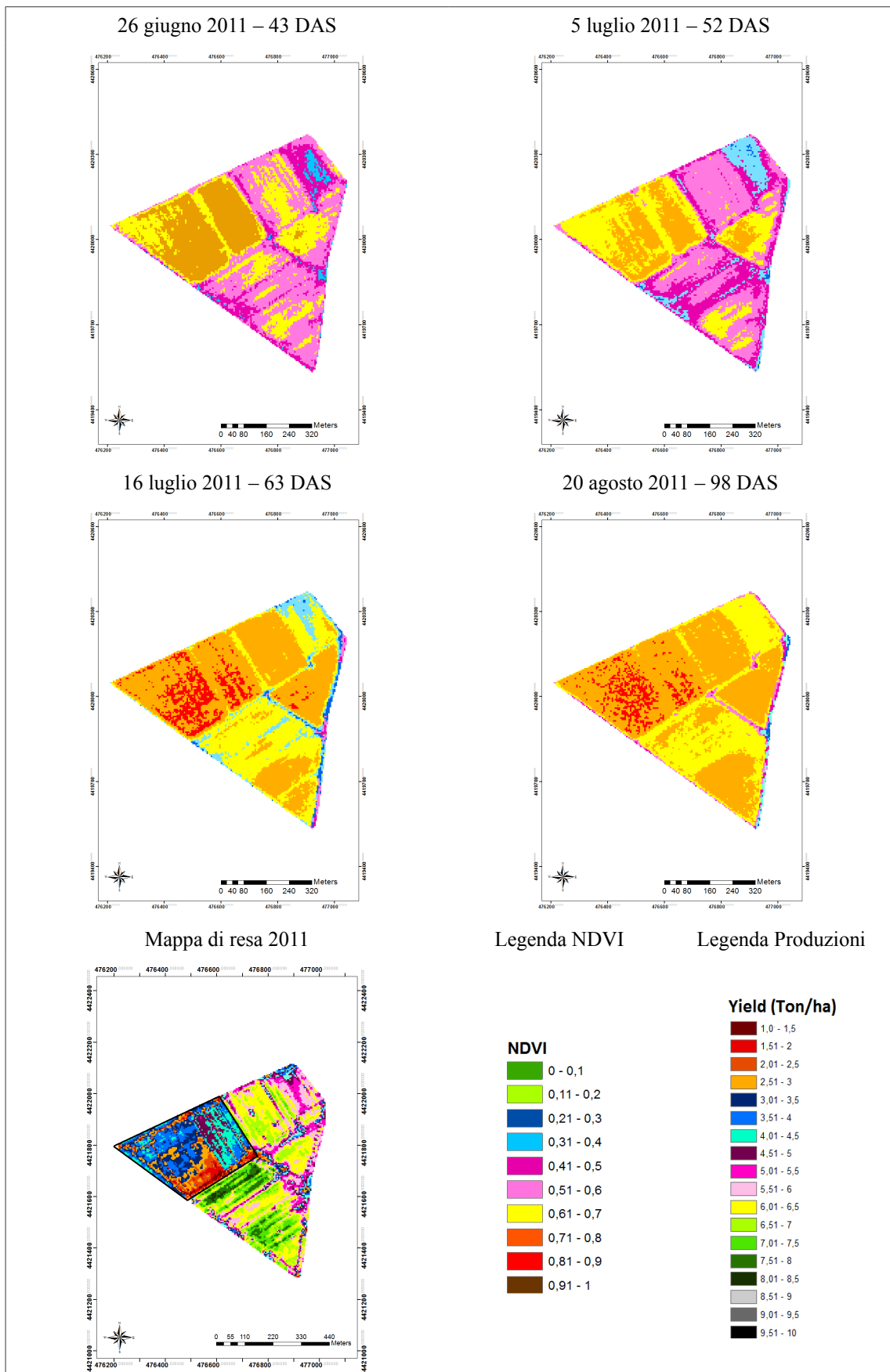


Fig. 44: Immagini satellitari (RapidEye) dell'area di studio, riportanti i valori del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) messe a confronto con la mappa delle rese 2011.

## 6.7 MAPPATURA DELLE PRODUZIONI

La mappatura della produzione di risone, effettuata attraverso la sensoristica e l'elaborazione *New Holland Intelliview* (Fig. 45), ha mostrato una ampia variabilità non sempre coincidente con la variabilità manifestata dalle mappe di NDVI. Fra le due annate c'è una forte differenza in termini di scala della variabilità, che emerge in misura evidentissima dal raffronto delle due immagini. Le maggiori differenze nel secondo anno (in Appendice Tavola XII) si riscontrano all'interno della singola camera benchè la produzione media fosse piuttosto omogenea, fuorchè per quanto riguarda la camera E; nel corso del 2011 emerge una fortissima variabilità fra le camere, e in particolare tra le varietà appartenenti alle subspecie *Indica* e *Japonica*.

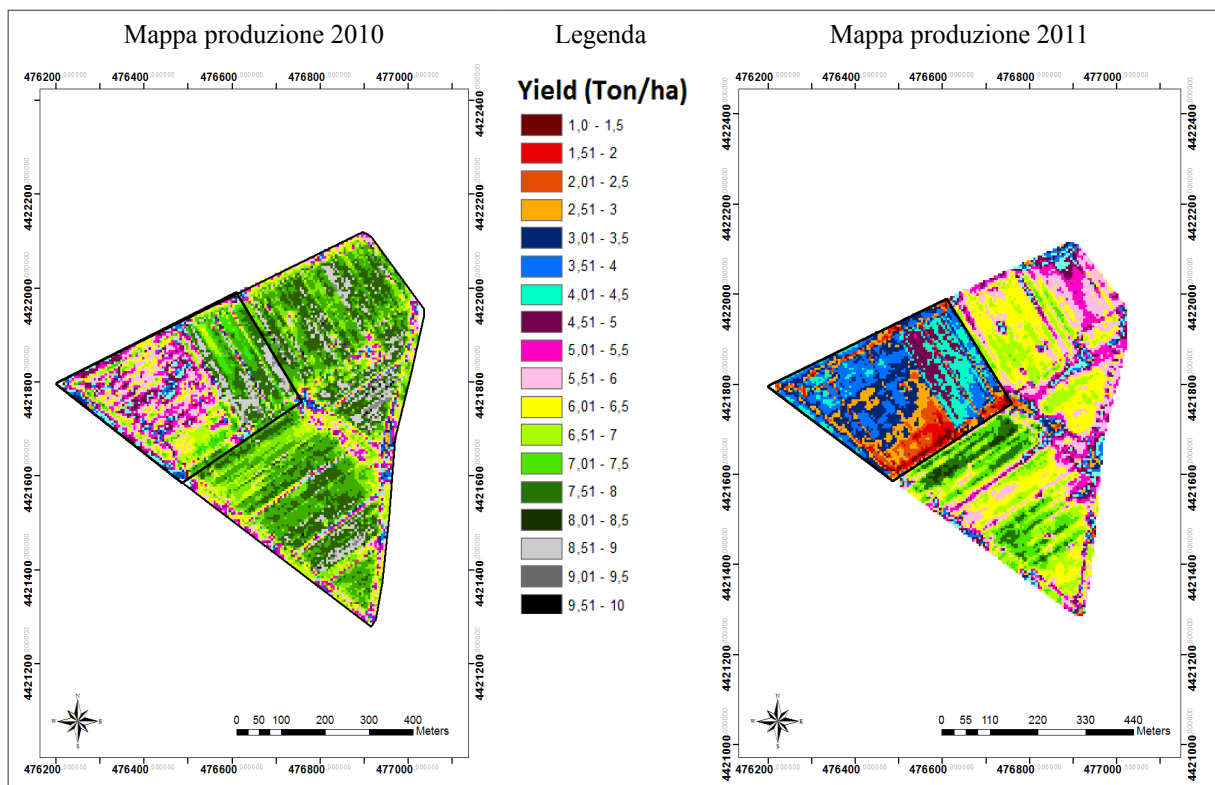


Fig. 45: Mappe di produzione del 2010 e del 2011

La mappa di produzione 2010 mostra delle affinità con la mappa in 73 DAS rispetto a tutte le altre, suggerendo una forte influenza della concimazione in copertura nel regolare la produttività della coltura.

Nel 2011 (in Appendice Tavola XVIII) la dinamica connessa con le operazioni di concimazione è ancora più evidente ed emerge con grande evidenza dal raffronto tra la mappa di produzione e la mappa dell'NDVI in 63 DAS, con particolare riferimento alle aree con valori più bassi di NDVI.

Il confronto fra le due mappe successive indica la presenza di una variabilità spaziale molto forte, che tende però a modificarsi tra gli anni. La variabilità temporale è più forte della variabilità spaziale, ed è difficile individuare punti che conservino nel tempo la stessa capacità produttiva. Vi sono aree particolare (camera F, H) in cui le sub-aree di maggiore e minore produzione si invertono da un anno all'altro. L'unica area che può essere definita “stabile” è la camera E, che, pur essendo storicamente la camera più produttiva, in entrambi gli anni di prova ha evidenziato le produzioni inferiori. È però necessario precisare che le cause che hanno determinato la scarsa produzione nella camera E sono differenti nei due anni: nel 2010 una fortissima infestazione da giavone e riso crodo non ha permesso alla coltura di svilupparsi adeguatamente; nel 2011, pur avendo mostrato un'ottimo comportamento dal punto di vista vegetativo, è stato riscontrato una altissimo tasso di sterilità in termini di pannocchie sterili per metro quadrato e di cariossidi sterili per pannocchia. I risultati dei due anni devono quindi essere letti separatamente, e non ascritti ad un carattere di bassa produttività stabile nella zona.

## 6.8 TOMOGRAFIA

La mancata previsione delle produzione da parte del rilievo satellitare ha suggerito l'ipotesi della presenza di un fattore pedologico che possa aver influito sull'affidabilità della misura. Per validare o meno questa ipotesi è stata svolta un'indagine di tipo sistematico sulla struttura e la tessitura del suolo, eseguita utilizzando il metodo ARP, effettuando misure in continuo per linee parallele su un transetto di 10 metri a tre

livelli di profondità. Dall'analisi delle carte di georesistività risulta che le aree pedologicamente omogenee coincidono con le aree produttive in termini di localizzazione, ma differiscono per superficie e intensità del dato, suggerendo che in realtà vi sia un'influenza indiretta della tipologia di suolo sulla capacità di sviluppo della coltura (Fig. 46, in Appendice, Tavole XIX - XXI).

La rappresentazione tomografica mostra una variabilità spaziale maggiore dell'atteso in termini di tessitura delle diverse aree. Lo strato informativo più interessante rappresentato dallo strato 0 – 0.5 m di profondità evidenzia un'ampia variabilità nella composizione dei suoli, sia tra le camere che nelle camere. Le aree scure rappresentano zone caratterizzate da una tessitura più grossolana, alto contenuto di sabbie e occasionale pietrosità. La composizione pedologica dei suoli appare piuttosto diversa negli strati più profondi, caratterizzati dalla presenza di ampie parti sabbiose ed argillose, con una riduzione delle aree a medio impasto.

Nella camera A ed F si riscontrano zone sabbiose anche nello strato più superficiale che se confrontate con le mappe di produzione, corrispondono alle aree più produttive per la camera F nel 2010, mentre non sembrano avere alcuna influenza per la camera A; nel 2011 accade il contrario: aree più sabbiose corrispondono ad aree meno produttive nella camera A, ma nella camera F non si nota una particolare relazione.

Per il 2010, sembra aver influito negativamente l'effetto dei suoli più argillosi (in blu) in particolare per la camera I, ma non per la camera B, a parità di resistività.

Più evidente l'effetto nel 2011, dove in particolare nella camera B si sono osservate le produzioni inferiori per quanto riguarda le varietà Karnak.

Da un punto di vista grafico, la composizione tessiturale dei suoli non appare da sola sufficiente a spiegare la variabilità spaziale della coltura, nè la sua evoluzione nel tempo.

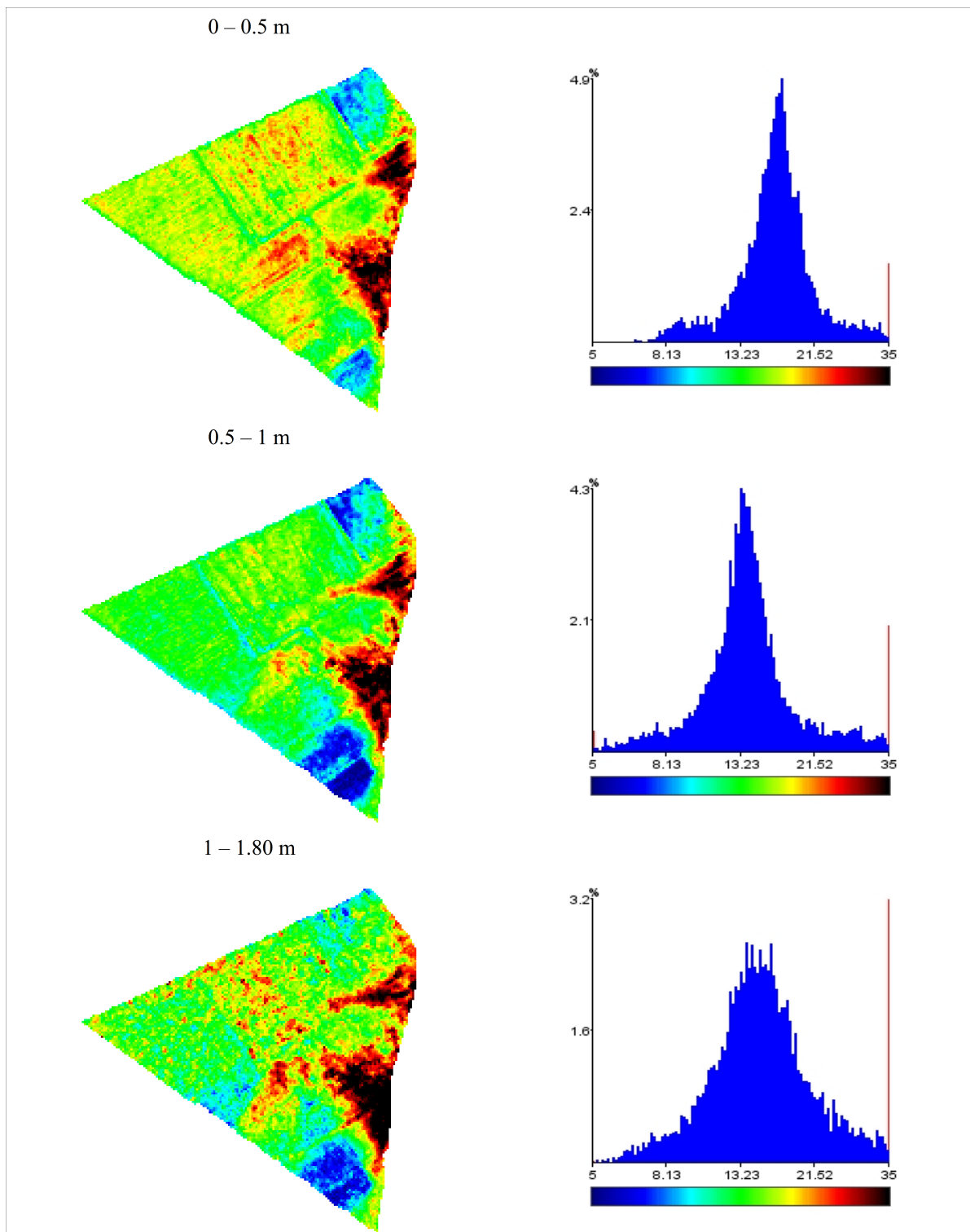


Fig. 46: Mappe di georesistività dell'area di studio a tre differenti profondità. Gli istogrammi a destra rappresentano la curva distribuzione per valori di resistività di ciascuno strato.

## 6.9 ANALISI DI CORRELAZIONE

L'analisi di correlazione tra le mappe satellitari Rapid Eye e le mappe di produzione è stata condotta con l'obiettivo di verificare la sussistenza della relazione tra la produzione e la risposta spettrale della coltura. In condizioni normali la produzione può essere stimata in funzione del valore dell'indice NDVI e dei suoi incrementi nel tempo, in virtù della relazione tra accrescimento della pianta e produzione.

Durante la prova si è registrata una relazione fra LAI e NDVI relativamente bassa. La presenza di un fattore di disturbo che ha interferito su questa relazione, ha impedito di effettuare una previsione coerente con le produzioni realmente misurate in campo.

L'analisi di correlazione ha la funzione di spazializzare la relazione tra NDVI e resa e di metterne in evidenza la distribuzione nello spazio. Le mappe di correlazione ottenute nel corso del primo anno (Fig. 47, in Appendice Tavole VIII-XI) evidenziano aree del tutto non correlate, o con correlazioni molto deboli (0.3 – 0.5). Su tutte, due aree presentano un comportamento costantemente negativo: la zona S-W della camera I e l'area al centro della camera E mostrano valori di correlazione negativi sempre compresi tra -0.5 e -1; lo spigolo N-E e il centro della camera G mostrano un valore costantemente positivo compreso tra 0.5 e 1.

Nella prima immagine vi è una prevalenza di aree non correlate o debolmente correlate positivamente; la seconda e la terza immagine indicano un progressivo aumento della correlazione, mentre nella quarta si osserva un deciso aumento delle aree correlate negativamente.

La dimensione eccessivamente limitata delle aree con pari coefficiente di correlazione e la loro mutevolezza nel tempo, non permettono di risalire direttamente alla causa che origina la variabilità.

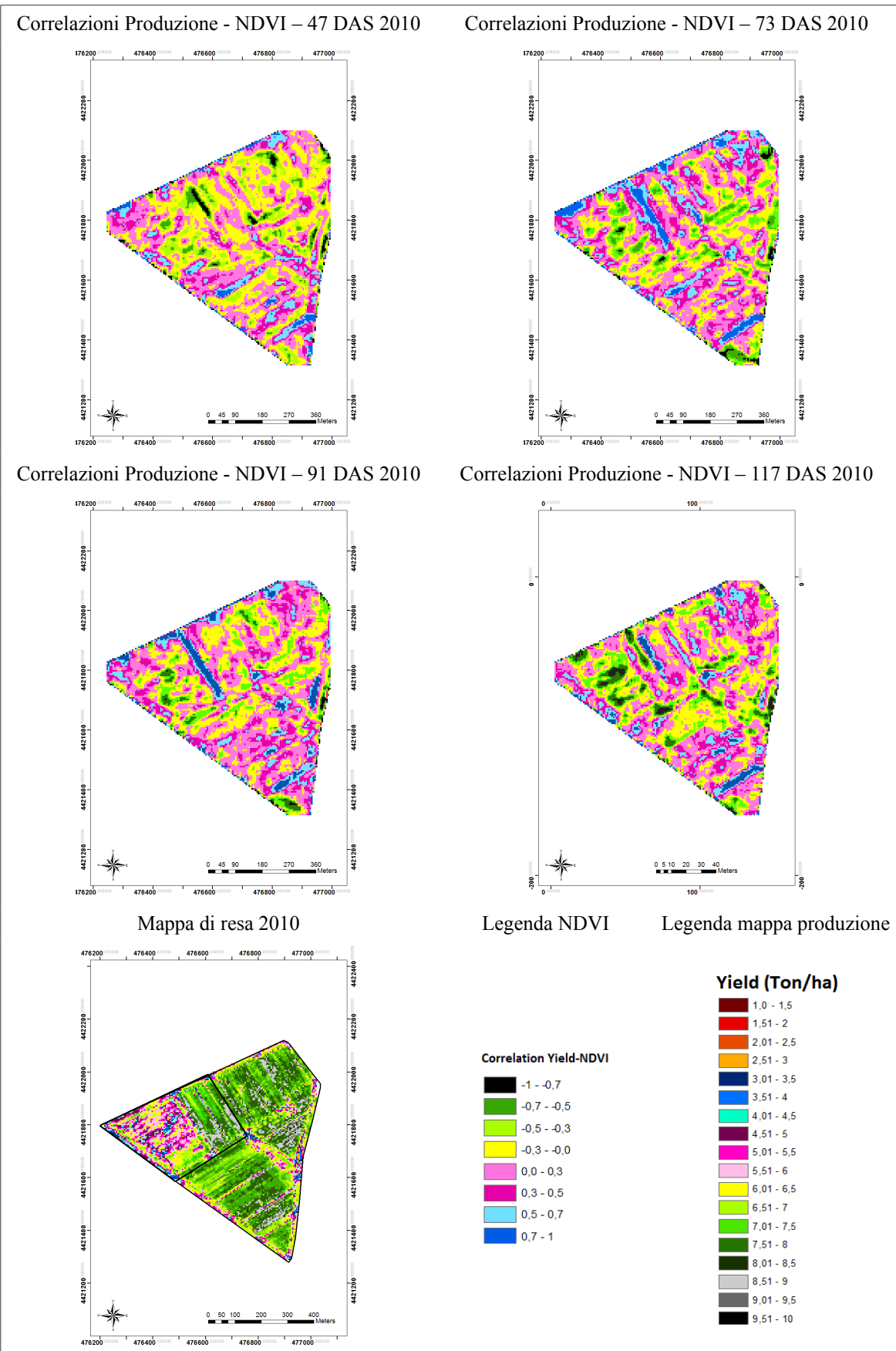


Fig. 47: Rappresentazione grafica dell'analisi di correlazione tra le immagini satellitari (RapidEye) dei valori del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e la mappa delle rese 2010.



La prima immagine del 2011 (Fig. 48, in Appendice Tavole XIII-XVII) mostra una ampia variabilità in termini di correlazione fra NDVI e produzione, come nell'anno precedente, con prevalenza di aree non correlate o debolmente correlate, eccetto per le aree nelle camere B, G e H, che appaiono fortemente correlate (0.7 – 1) fin dal primo rilievo fino all'ultimo. Una ulteriore area stabile è individuata a W della camera A, con valori negativi e sistematicamente alti.

In termini generali, in entrambi gli anni la variazione nel tempo degli indici di correlazione e la distribuzione frammentaria delle aree omogenee rappresenta un forte limite all'individuazione dei fattori che generano la variabilità.

La continua evoluzione della forma e della dimensione delle aree omogenee, legata alle dinamiche di disseccamento delle infestanti dopo il diserbo, allo sviluppo della coltura del riso dopo le concimazioni e all'emergenza di nuove infestanti, dà un'idea grafica, ma difficilmente quantificabile, del grado di variabilità temporale e spaziale.

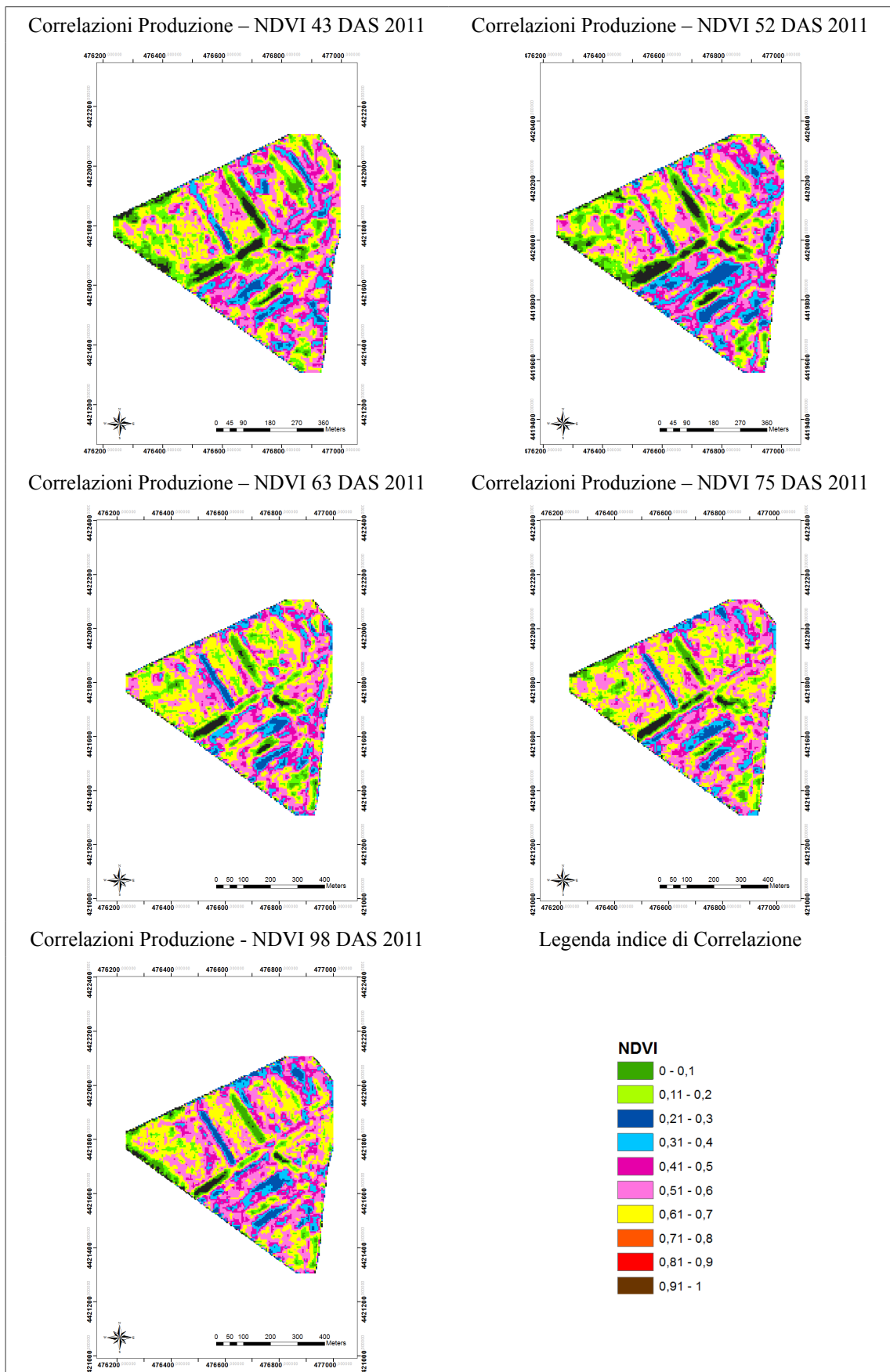


Fig. 48: Rappresentazione grafica dell'analisi di correlazione tra le immagini satellitari (RapidEye) dei valori del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e la mappa delle rese 2010.

La terza e più riassuntiva analisi di correlazione riguarda i dati di NDVI e di produzione dei due anni analizzati insieme (Fig. 49, in Appendice Tavole XXII-XXIV).

Analizzando le immagini in ordine cronologico, si osserva un graduale aumento dei valori assoluti delle correlazioni tra NDVI e produzioni dei due anni, così come un progressivo aumento della significatività. Può essere individuata una sola area che presenti stabilmente valori positivi di correlazione, disposta in maniera longitudinale all'interno della camera F, mentre ampie zone del campo sono caratterizzate da correlazioni stabilmente negative, in particolare nelle camere D ed E. La particolare conformazione lineare delle aree omogenee riproduce la disposizione dei passaggi delle macchine durante lo svolgimento delle operazioni colturali, suggerendo la presenza di un fattore antropico concausa di variabilità.

Contrariamente a quanto accade generalmente, l'analisi di correlazione sembra suggerire che a maggiori valori di NDVI (quindi di LAI e di biomassa) corrispondano produzioni inferiori, e che per contro le produzioni maggiori siano da associare ad un valore di NDVI minore, fatto che contraddice quanto misurato in campo (Figg. 16 e 17).

Una risposta a questa contraddizione può essere data se si considera valida l'ipotesi per cui un maggior grado di competizione può determinare tanto una maggiore risposta spettrale per via della maggiore superficie fotosintetica quanto una produzione tendenzialmente inferiore. Si consideri che nel 2010 si è osservata una notevole densità di piante infestanti e che nel 2011 la forte disomogeneità alla semina ha in parte compromesso le produzioni.

La prima immagine si riferisce al momento in cui sono appena stati eseguiti gli interventi di diserbo, per cui la risposta spettrale è composta quasi esclusivamente dalla coltura. La relazione negativa tra NDVI e resa nelle camere D ed E potrebbe essere dovuta alla densità di semina del 2011 (camera D 572-404 piante m<sup>-2</sup>; camera E 584-464 piante per m<sup>-2</sup>) e all'elevato indice di accestimento (D 1.6-2.2; E 1.1-2.0), che potrebbe aver determinato un eccessivo carico di piante per unità di superficie.

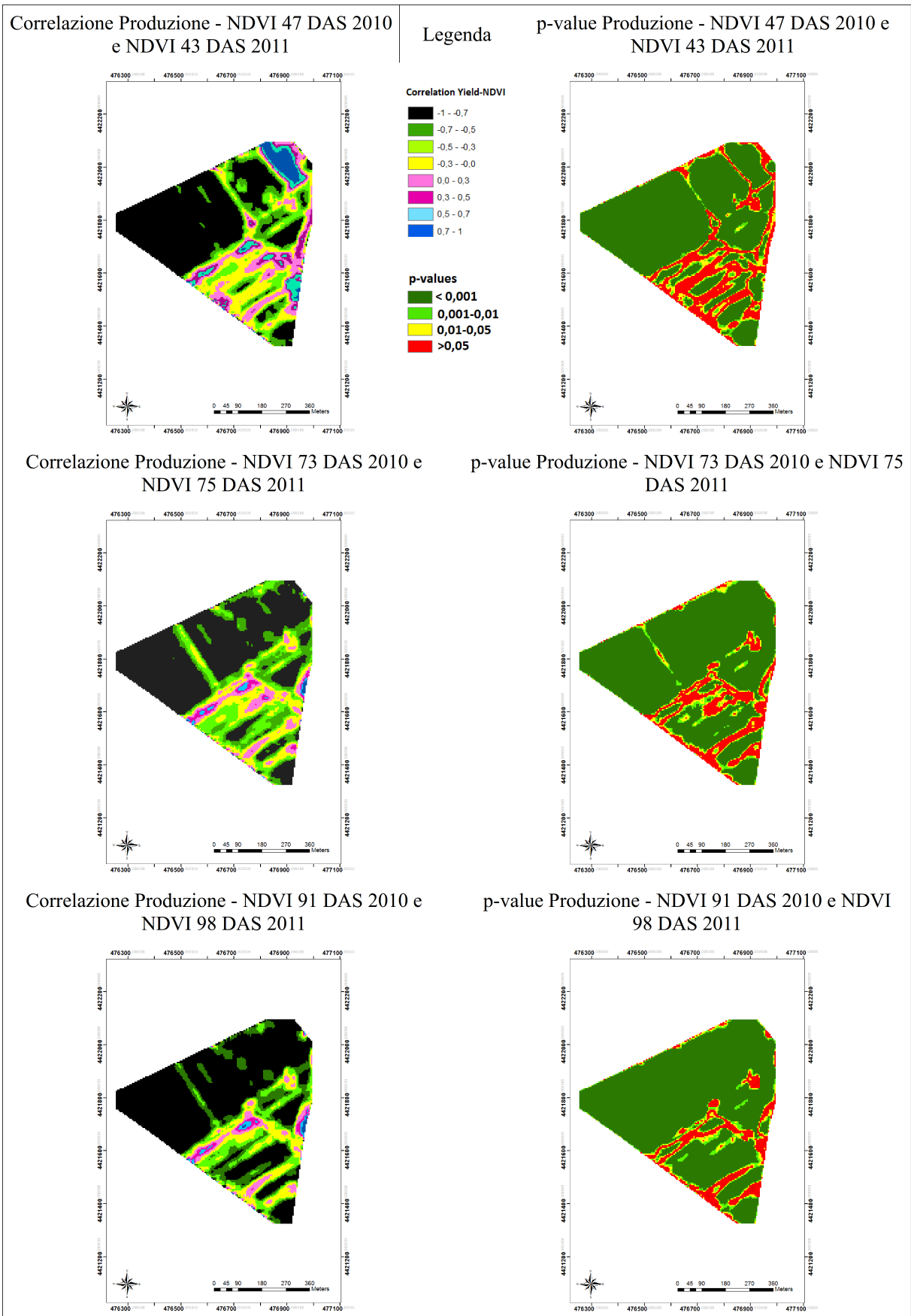


Fig. 49: Rappresentazione grafica dell'analisi di correlazione tra le immagini satellitari (RapidEye) dei valori del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e le mappe delle produzioni 2010. e 2011.

Nella stessa camera è stata registrata la maggiore quantità di pannocchie per unità di superficie, ma non la maggiore produzione.

La camera B è quella in cui si è registrata la maggiore variabilità in termini di emergenza (720-40 piante m<sup>-2</sup>) e di relativo accostamento (0.4 – 7.8). L'effetto dell'accostamento in questa camera è reso più evidente dal confronto del primo e del secondo rilievo con l'inversione della correlazione.

Zone negativamente correlate in maniera stabile possono avere cause differenti negli anni, come il caso della camera I che nel 2010 ha evidenziato livelli decisamente alti nel parametro ALA e una produzione media, mentre nel 2011, pur avendo valori iniziali di biomassa relativamente bassi ha raggiunto una produzione in linea con la media del campo.

La terza immagine, che mostra i valori di correlazione inversa e i livelli di significatività maggiori, mostra l'effetto congiunto della massima densità di materiale fotosintetico, dovuto al periodo (la coltura sta raggiungendo il suo massimo accrescimento) e alla presenza delle nuove infestanti, emerse dopo gli interventi di diserbo.

Sulla base di queste ipotesi, si potrebbe affermare che la competizione interna al campo determina uno squilibrio tra produzione e risposta spettrale che dipende dalla densità nelle tre dimensioni della vegetazione. La densità e le relative caratteristiche spettrali variano in funzione non soltanto della fittezza della pianta coltivata, ma anche delle infestanti che avendo caratteristiche morfologiche e fisiologiche molto simili al riso hanno anche le stesse proprietà dal punto di vista spettrale.

## 6.10 ZONAZIONE

La Zonazione (o *Zoning*) è una operazione finalizzata alla delimitazione delle aree omogenee secondo il loro grado di variabilità spaziale e alla stabilità nel tempo delle caratteristiche misurate nel corso degli anni. La zonizzazione ricopre una particolare importanza nello stabilire le varietà da utilizzare nelle diverse aree e le operazioni

colturali da effettuare per cercare di contenere la naturale variabilità entro limiti accettabili o sfruttarne al massimo le opportunità che offre. A partire dalle mappe di produzione ottenute nei due anni di studio sono elaborate le mappe della variabilità in cui ciascun pixel rappresenta una classe di variabilità spaziale e temporale.

Dall'analisi cartografica si stabilisce quali aree risultano più variabili nello spazio e in che misura la variabilità si conserva nel tempo.

La mappa di zonazione proposta prende in considerazione le produzioni misurate nei due anni, analizzate simultaneamente per mettere in maggiore evidenza la stabilità temporale, benchè i dati di soli due anni non possano essere considerati sufficienti come serie storica.

Le classi di variabilità stabilite per la coltura, elaborate separatamente per le camere (A, B, C, F, G, H, I e C e D) riassumono sia aspetti di variabilità spaziale che temporale.

Per le camere A, B, C, F, G, H, I:

- Classe1: Variabilità spaziale =-22, Variabilità temporale=0,85. Produzione inferiore alla media del campo, elevata variabilità spaziale ed elevata variabilità temporale con evidenti differenze fra i due anni;
- Classe2: Variabilità spaziale =0.66, Variabilità temporale=0,83. Produzione prossima alla media del campo, variabilità temporale moderata.
- Classe3: Variabilità spaziale =12, Variabilità temporale=0,6. Produzione decisamente più alta rispetto alla media del campo, variabilità temporale bassa e stabile nei due anni.

Per le camere D ed E:

- Classe4: Variabilità spaziale =-23, Variabilità temporale=1,21. Produzione bassa rispetto alla media del campo, elevata variabilità spaziale ed elevata variabilità temporale, instabile nei due anni.
- Classe5: Variabilità spaziale =0,28, Variabilità temporale=1,15. Produzione molto prossima alla media dell'intero campo, ma instabile nei due anni.
- Classe6: Variabilità spaziale =29, Variabilità temporale=1,78. Produzione marcatamente più alta rispetto alla media dell'intero campo, ma instabile nei due anni.

È evidente l'assenza di una classe stabile per le categorie delle camere D ed E, e tale instabilità temporale è dovuta principalmente alla disponibilità di soli due anni di studio.

I test di separazione mostrano una separabilità ottimale tra le classi 1-3 (1.95 e 1.99, test di Jeffries Matusita e *Transformed Divergence*, rispettivamente), tra le classi 4-6 (1.99 J-M, 2.00 TD) e le classi 5-6 (1.98 J-M, 1.98 TD).

Le classi 1-3 risultano separabili solo per l'indice '*Transformed Divergence*' (1.99) ma non per quello Jeffries-Matusita (1.95). Le classi 2 e 3 così come le 4 e 5 sono associate a valori di entrambi gli indici circa pari a 1.8.

In effetti, le classi 4 e 5 mostrano valori di resa media (5.6 e 6 t ha<sup>-1</sup> circa) tra loro più prossimi rispetto alla classe 6 (7.8 t ha<sup>-1</sup>) così come le classi 2 e 3 presentano produzioni medie rispettivamente di 7.6 e 7.9 t ha<sup>-1</sup> a fronte del valore ben più basso (6.3 t ha<sup>-1</sup>) associato alla zona 1.

Al fine di caratterizzare efficacemente le aree omogenee così individuate sarebbe opportuno disporre di ulteriori anni di indagine.

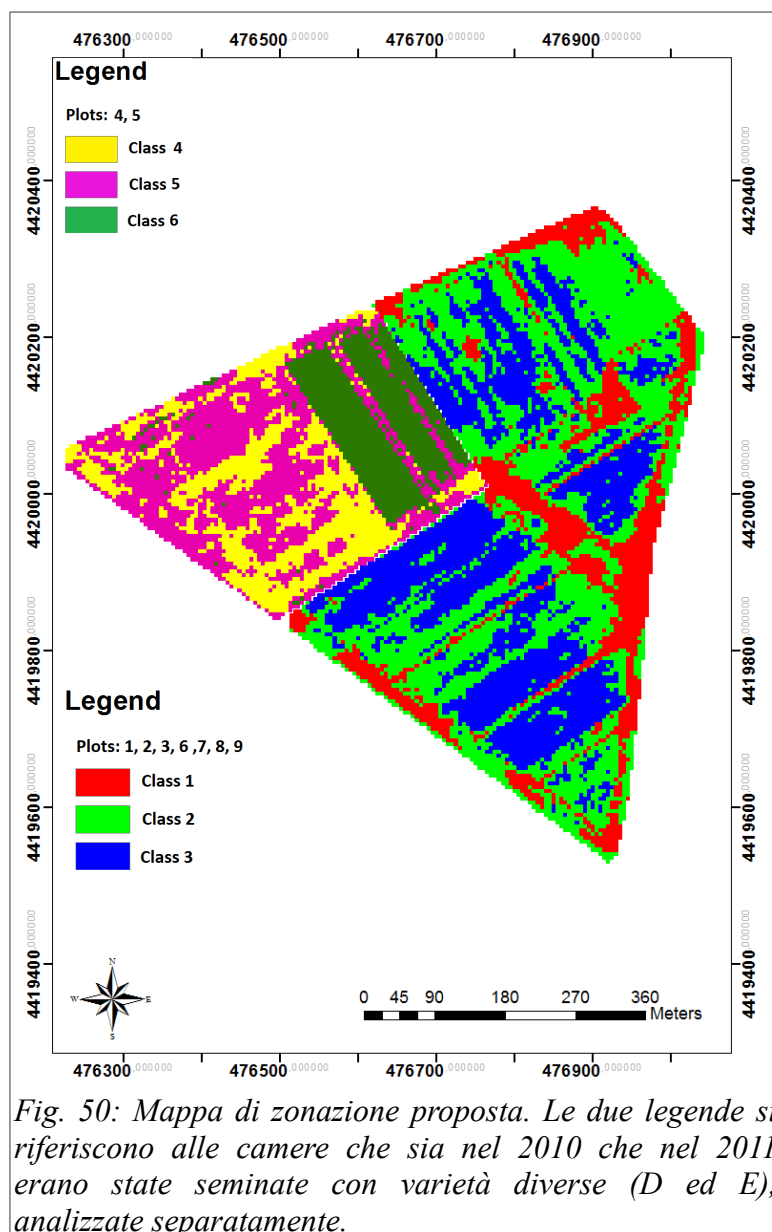


Fig. 50: Mappa di zonazione proposta. Le due legende si riferiscono alle camere che sia nel 2010 che nel 2011 erano state seminate con varietà diverse (D ed E), analizzate separatamente.

## 7 CONCLUSIONI

L'utilizzo di sistemi di telerilevamento di tipo *Remote* o *Proximal sensing* può fornire indicazioni fondamentali per la valutazione dello stato della coltura e per la pianificazione di interventi correttivi durante le sue fasi di sviluppo. È già stata largamente dimostrata l'utilità degli indici spettrali nella stima del LAI e di aspetti connessi con le produzioni in molte colture e diversi indici sono stati elaborati appositamente per valutare variabili di interesse agronomico.



L'applicazione di tecnologie di *Proximal* o *Remote Sensing* possono essere utilizzati per la stima del vigore della pianta e per effettuare delle stime indirette sulla potenzialità produttiva della coltura in maniera rapida e non distruttiva in tutte le fasi della coltura. Lo studio condotto dimostra che in applicazioni reali in scala di campo risulta difficile ottenere dati facilmente interpretabili come in applicazioni sperimentali, perchè il numero delle variabili che entrano in gioco è molto alto e non tutte possono essere facilmente controllabili.

La presenza dell'acqua durante tutto il ciclo colturale è un fattore che sicuramente incide sulle proprietà spettrali della coltura e sulle caratteristiche della radiazione riflessa dalla superficie terrestre; tuttavia, molti degli indici hanno dimostrato di poter essere proficuamente utilizzati come supporto decisionale per l'imprenditore agricolo.

L'utilizzo congiunto di rilievi satellitari, tomografici e radiometrici, se correttamente interpretati, può consentire di cogliere aspetti non visibili che possono rivelarsi di grande importanza nella determinazione della variabilità spaziale e temporale. L'acquisizione di dati da origini diverse dà inoltre la possibilità di studiare diversi aspetti dello stesso fenomeno e di comprenderne in maniera più completa le cause e gli effetti sulla produzione.

Le particolari condizioni contingenti che si sono verificate durante i due anni di prova hanno messo in evidenza molti dei limiti degli indici, ma ne hanno anche valorizzato la versatilità e la capacità di essere utilizzati in modi alternativi, come nell'analisi di correlazione, per valutare e quantificare variabili non rilevate direttamente in campo.

## 8 BIBLIOGRAFIA

Assessorato della Programmazione, Bilancio e assetto del territorio, Regione Autonoma della Sardegna. Piano Generale delle Acque, S.EL.CA, Firenze, 1986

Bannari, A., Huete, A. R., Morin, D., & Zagolski, F. (1996). Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de ve'ge'tation. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1885–1906.

Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.*, 35, 161–173.

Baret, F., Guyot, G., & Major, D. J. (1989). TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *Proc. IGARSS'89 and 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Canada* ( pp. 1355– 1358).

Basso B., Amato M., Bitella G., Rossi R., Kravchenko A., Sartori L., Carvahlo L. M., Gomes J. Two-Dimensional Spatial and Temporal Variation of Soil Physical Properties in Tillage Systems Using Electrical Resistivity Tomography, *Agronomy Journal* (2010) *Vol. 102 No. 2, p. 440-449*

Basso B, Ritchie JT, Pierce FJ, Braga RP and Jones JW (2001). Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems* 68, 97-112.

Basso, B., Bertocco, M., Sartori, L., Martin, E.C., 2007. Analysing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation. *Eur. J. Agron.*26, 82–91.

Basso B., Sartori L., Bertocco M., 2005. *Agricoltura di precisione*. Edizioni l'Informatore Agrario, Verona, IT.

Blackmore, S. 2003. The role of yield maps in Precision Farming. PhD Thesis. Cranfield University at Silsoe. National Soil Resources Institute.

Broge, N. H., & Leblanc, E. (2000). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.*, 76, 156–172.

Brown, L., Jin, M. C., Lablanc, S. G., & Cihlar, J. (2000). A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote Sens. Environ.*, 71, 16– 25.

Cabangon R.J. *et al.* 2011. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and dryng irrigation. *Field Crops Research*, 121:136-146.

Cammarano D., Fitzgerald G., Basso B., O’Leary G., Chen D., Grace P., Fiorentino C. 2011. Use Of Canopy Chlorophyl Content Index (CCCI) For Remotely Estimation Of Wheat Nitrogen Content In Rainfed Environmnets. *Agronomy Journal*, Vol. 103, Issue 6.

Castrignanò A. *Introduction to spatial data processing* (2011). Aracne Editrice, Roma.

Chappelle, E. W., Kim, M. S., & McMurtrey III, J. E. (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and the carotenoids in soybean leaves. *Remote Sens. Environ.*, 39, 239– 247.

Chen, J. (1996). Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Can. J. Remote Sens.*, 22, 229–242.

Chen, J., & Cihlar, J. (1996). Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat Thematic Mapper. *Remote Sens. Environ.*, 55, 153– 162.

Chengyuan, H., H. Shaohong, & X. Chuanyang. (2008). Comparison of some vegetation indices in seasonal information. *Chinese Geographical Science*, 18, 242-248. <http://dx.doi.org/10.1007/s11769-008-0242-y>

Darvishzadeh R, Atzberger C., Skidmore A. K., 2006. Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index. *GeoInformation Science*.

Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown de Colstoun, E., & McMurtrey III, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 74, 229– 239.

Dawson, T. P., Curran, P. J., and Plummer, S. E., 1998, LIBERTY modelling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65, 50± 60.

Ente Nazionale Risi, 2011. [http://www.enterisi.it/ent\\_queriesuperfici1.jsp](http://www.enterisi.it/ent_queriesuperfici1.jsp)

Esfahani M., Ali Abbasi H., R., Rabiei B., Kavousi M., 2008. Improvement of nitrogen management in rice paddy fields using chlorophyll meter (SPAD) . *Paddy Water Environment*, 6:181–188 .

Fassnacht, K. S., Gower, S. T., MacKenzie, M. D., Nordheim, E. V., & Lillesand, T. M. (1997). Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forest using Landsat Thematic Mapper. *Remote Sens. Environ.*, 61, 229–245.

Fen Fang Lin, Le Feng Qiu, Jing Song Deng , Yuan Yuan Shi, Li Su Chen, Ke Wang, 2009. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71S S60–S65

Gamon, J. A., Penuelas, J., & Field, C. B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.*, 41, 35– 44.

Gitelson, A., Rundquist, D., Derry, D., Ramirez, J., Keydan, G., Stark, R., & Perk, R. (2001). Using remote sensing to quantify vegetation fraction in corn canopies. *Proc. Third Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*, Denver, Colorado, 3 –7 November 2001.

Gholizadeh A., Amin M.S.M, Anuar A.R., Aimrun W., 2009. Evaluation of Leaf Total Nitrogen Content for Nitrogen Management in a Malaysian Paddy Field by

Using Soil Plant Analysis Development Chlorophyll Meter. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 4:278-282.

Ghosh D.C., B.P. Singh. 1998 Crop growth modeling for wetland rice management. *Environ. and Ecol.* 16(2): 446-449.

Gilabert, M.A., S. Gandia, and J. Melia. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sens. Environ.* 55:11–20.

Gilabert, M.A., Melia, J., 1990. Usefulness of the temporal analysis and the normalized difference in the study of rice by means of Landsat-5 TM images: establishment of relationships for yield prediction purpose. *Geocarto Int.* 5, 27±32.

Goel, N. S. (1988). Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sens. Rev.*, 4, 1–212.

Govaerts, Y. M., Verstraete, M. M., Pinty, B., & Gobron, N. (1999). Designing optimal spectral indices: A feasibility and proof of concept study. *Int. J. Remote Sens.*, 20, 1853– 1873.

Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 81, 416– 426.

Haboudane D., Miller J. R., Pattey E., Zarco-Tejada P. J., Strachan I. B., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90:337–352

Holben, B.N., C.J. Tucker, and C.J. Fan. 1980. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46:651–656.

Hu, B., Miller, J. R., Chen, J. M., & Hollinger, A. B. (2004). Retrieval of the canopy leaf area index in the BOREAS flux tower sites using linear spectral mixture analysis. *Remote Sens. Environ.*, 89, 176–188.

Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., and van Leeuwen, W. (1997), A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 59:440-451.

Huete, A. R. (1988). A soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 25, 295–309.

Inouea Y. Sakaiyab E., Zhuc Y., Takahashid W. (2012). Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements . *Remote Sensing of Environment* , 126, Pages 210–221

Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilve, H., & Frangi, J. -P. (2000). Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode. *Remote Sens. Environ.*, 74, 417–481.

Jackson D. R., Huete A. R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive veterinary medicine*, 11:185-200.

Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., *et al.* (2008). Development of a two band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3833-3845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.006>

Karnieli, A., Kaufman, Y. J., Remer, L., & Wald, A. (2001). AFRI—aerosol free vegetation index. *Remote Sens. Environ.*, 77, 10– 21.

Kaufman, Y. J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, 261– 270.

Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W., McMurtrey III, J. E., & Walthall, C. L. (1994). The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). *Proceedings of the 6th Symp. on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Jan. 17–21, 1994, Val D’Isere, France ( pp. 299–306).

Leblon, B., M. Guerif, and F. Baret. 1991. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice. *Remote Sens. Environ.* 38:147–158.

Lillesaeter, O. (1982). "Spectral reflectance of partly transmitting leaves: Laboratory measurements and mathematical modeling." *Remote Sens. Environ.*, 12, 247– 254. model and field observations. *International Journal of Climatology*, 1(1-4), 237-254.

Motohka, T., Nasahara, K. N., Murakami, K., *et al.* (2011). Evaluation of Sub-Pixel Cloud Noises on MODIS Daily Spectral Indices Based on in situ Measurements. *Remote Sensing*, 3, 1644-1662. <http://dx.doi.org/10.3390/rs3081644>

Patel, N.K., T.P. Singh, B. Sahai, and M.S. Patel. 1985. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. *Int. J. Remote Sens.* 6:657–664.

Pierce, F.J., and P. Novak. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv. Agron.* 67:1–85.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Keer, Y. H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sens. Environ.*, 48, 119–126.

Pinty B. and Verstraete M.M. 1992. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101:15-20.

R-Project Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Regione Autonoma della Sardegna, Layer WMS, [www.sardegнатerritorio.it](http://www.sardegнатerritorio.it)

Rondeaux G., Steven M., Baret F., (1996). Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices, *Remote sensing of environment*, 55, 95-107

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symp., NASA SP-351 1, pp. 309–317.

Sakamoto, T., Cao, P. V., Nguyen, N. V., *et al.* (2009). Agro-ecological interpretation of rice cropping systems in flood-prone areas using MODIS Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75, 413-424.

Spanner, M. A., Pierce, L. L., Peterson, D. L., & Running, S. W. (1990). Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, 11, 95-111.

Spanu A., Murtas A., Ledda L., Ballone F., 2004. Root system development in flooded and sprinkler irrigated rice cultivars. Proceeding of the Conference “Challenges and Opportunities for Sustainable Rice-Based Production Systems” - Torino – Italy – 13-15 September.

Stafford J. V., Implementing Precision Agriculture in the 21st Century , *Journal of Agricultural Engineering Research* (2000), 76, 267-275

D. Stroppiana, Boschetti M., Confalonieri R. and Bocchi S. (2006) “Evaluation of LAI-2000 for leaf area index monitoring in paddy rice”, *Field Crops Research*. 99, 167-170.

Sun Y.F., J.M. Liang, J. Ye, W.Y. Zhu., 1999. Cultivation of super-high yielding rice plants. *China Rice*. 5:38-39.

Thakur D.S., S.R. Patel., 1998 Growth and sink potential of rice as influenced by the split application of potassium with FYM in inceptisols of eastern central India. *J. Potassium Res.* 14(1/4):73-77.

Thenkabail P. S., Smith R. B. De Pauw E., 2000. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71-2: 158-182

Vaesen K., Gilliams S., Nackaerts K., Coppin P., 2001. Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: the case of paddy rice. *Field Crops Research* 69 13±25



Wooten, J.R., D.C. Akins, J.A. Thomasson, S.A. Shearer, and D.A. Pennington. 1999. Satellite imagery for crop stress and yield prediction: Cotton in Mississippi. ASAE Paper 991133. ASAE, St. Joseph, MI.

Xiao, X. M., Braswell, B., Zhang, Q. Y., *et al.* (2003). Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: continental-scale observations in Northern Asia. *Remote Sensing of Environment*, 84, 385-392. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00129-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00129-3)

Xiao, X., Boles, S., Frohling, S., *et al.* (2006). Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 100, 95-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.004>

Xiao, X., Boles, S., Liu, J., *et al.* (2005). Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 95, 480-492. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.009>

Yang, C.-M., and R.-K. Chen. 2004. Modeling rice growth using hyperspectral reflectance data. *Crop Sci.* 44:1283–1290.

Yang, C.-M., and R.-K. Chen. 2007. Differences in growth estimation and yield prediction of rice crop using satellites data simulated from near ground hyperspectral reflectance. *J. Photogram. Remote Sens.* 12:93–105.

Yuh-Jyuan LEE, Chwen-Ming YANG, Kuo-Wei CHANG, and Yuan SHEN, 2011. Effects of nitrogen status on leaf anatomy, chlorophyll content and canopy reflectance of paddy rice. *Botanical Studies* (2011) 52: 295-303.

Zhang N., Wang M, Wang N., Precision agriculture - a worldwide overview, *Computers and Electronics in Agriculture* (2002), 36, 113 - 132

Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Noland, T. L., Mohammed, G. H., & Sampson, P. H. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrow band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(7), 1491–1507.

## 9 APPENDICE



### CARNISE (Novità)

**TIPO DI GRANELLO**  
Lungo A da mercato interno

**CICLO**  
Di stagione

#### NOTE

E' una varietà tipo Carnaroli, con taglia medio-bassa, assenza di arista, ciclo vegetativo di stagione, maggior resistenza alle malattie ed all'allettamento, maggior capacità produttiva e resa alla lavorazione. Il granello ha un comportamento in cottura simile a Carnaroli.

#### ANNO DI ISCRIZIONE AL REGISTRO NAZIONALE

2008

#### DATI DESCRITTIVI

Culmo	taglia	media
	colore nodi	verde
	colore internodi	verde
	colore guaina	verde
Foglia	colore	verde
Pannocchia	tipo	intermedia
	portamento	semipendula
	aristatura	mutica
Spighetta	colore apice	pigmentato
	colore carena e calotta	pigmentato
	villosità	presente
	peso 1000 semi	44,8
Granello lavorato	lunghezza	6,8
	rapporto lungh/largh	2,2
	colore pericarpo	bianco
	classificazione UE	lungo A
Caratteri merceologici	perlatura	perlato
	aroma	non aromatico
	endosperma: tipo	non glutinoso
	amilosio	alto

#### DATI AGRONOMICI

Dose semina	210-230 kg/ha
Epoca di semina	20/30 aprile
Tolleranza all'allettamento	elevata
Tolleranza al Brusone fogliare / Mal del collo	buona
Tolleranza all'Elmintosporiosi	buona
Capacità produttiva	buona
Adattabilità alla semina interrata	elevata
Livello di fertilità richiesta	buono
Tolleranza al freddo in fase germinativa	elevata
Tolleranza al freddo in fioritura	elevata

SCHEDA DI ACCERTAMENTO DEI CARATTERI MORFOFISIOLOGICI				
Specie : <i>Oryza sativa</i>		Denominazione: <b>Karnak</b>		
Genealogia:				
Responsabile della conservazione in purezza:		Az. Agr. Melzi d'Eiril	Introduzione: 2002	
Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo	
	<b>1</b>	<b>Foglia</b>		
2	a	colore verde pigmentato	X	
	b	portamento eretta intermedia orizzontale riflessa	X	
	<b>2</b>	<b>Culmo</b>		
12	a	taglia (cm)	83,0	
11	b	diametro culmo (mm)		
13	c	colore nodi verde pigmentato	X	
	d	colore internodi verde pigmentato	X	
	e	colore guaina verde pigmentato	X	
	f	colore giuntura verde pigmentato	X	
	g	colore auricole verde pigmentato	X	
		<b>3</b>	<b>Foglia paniculare</b>	
		a	portamento eretta intermedia orizzontale riflessa	X
	<b>4</b>	<b>Pannocchia</b>		
	a	lunghezza (cm)	26,0	
15	b	tipo compatta intermedia aperta	X	
	c	eserzione molto eserta eserta inguainata	X	
	d	portamento eretta semieretta semipendula pendula	X	
20	e	aristatura mutica semimutica semiaristata aristata	X	
10	f	colore stigmi ialino violetto	X	

Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo
	<b>5</b>	<b>Glumella</b>	
	a	villosità	assente presente X
19	b	aristatura	mutica X corta lunga
9	c	colore apice	apigmentato pigmentato X
7 e 8	d	colore carena e calotta	apigmentato pigmentato X
	e	colore glume	apigmentato pigmentato X
	<b>6</b>	<b>Spighetta</b>	
23	a	lunghezza (mm)	9,77
24	b	larghezza (mm)	4,02
22	c	peso 100 semi (g)	4,26
	<b>7</b>	<b>Cariosside</b>	
25	a	lunghezza (mm)	7,32
26	b	larghezza (mm)	3,40
27	c	rapporto L/l profilo	arotondato < 1,75 semiarotondato 1,76-1,99 semiaffusolato 2,0 - 2,45 X affusolato 2,46-3,00 lungo B > 3,00
28	d	peso 100 semi (g)	
	e	colorazione pericarpo	bianco X colorato
	<b>8</b>	<b>Caratteri merceologici</b>	
29	a	cariosside: perlatura	presenza X assenza
	b	aroma	non aromatico X aromatico
30	c	endosperma: tipo	non glutinoso X glutinoso
	d	contenuto in amiloso % ss	20,9
	e	consistenza kg / cm <sup>2</sup>	1,03
	f	collosità g x cm	0,50
	<b>9</b>	<b>Cicli vegetativi</b>	
6	a	semina - spigatura (gg)	95
21	b	semina - maturazione (gg)	160
<b>NOTE:</b>			

SCHEDA DI ACCERTAMENTO DEI CARATTERI MORFOFISIOLOGICI			
Specie : <i>Oryza sativa</i>		Denominazione: <b>Libero</b>	
Genealogia:			
Responsabile della conservazione in purezza:		Ente Nazionale Risi	Introduzione: 2006
Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo
	<b>1</b>	<b>Foglia</b>	
2	a	colore verde	X
		pigmentato	
	b	portamento eretta	
		intermedia	X
		orizzontale	
		riflessa	
	<b>2</b>	<b>Culmo</b>	
12	a	taglia (cm)	78,0
11	b	diametro culmo	medio
13	c	colore nodi verde	X
		pigmentato	
	d	colore internodi verde	X
		pigmentato	
	e	colore guaina verde	X
		pigmentato	
	f	colore giuntura verde	X
pigmentato			
g	colore auricole verde	X	
	pigmentato		
	<b>3</b>	<b>Foglia paniculare</b>	
	a	portamento eretta	
		intermedia	X
		orizzontale	
		riflessa	
	<b>4</b>	<b>Pannocchia</b>	
	a	lunghezza (cm)	28,0
15	b	tipo compatta	
		intermedia	X
		aperta	
	c	eserzione molto eserta	
		eserta	X
		inguainata	
	d	portamento eretta	
		semieretta	
		semipendula	X
		pendula	
20	e	aristatura mutica	X
		semimutica	
		semiaristata	
		aristata	
10	f	colore stigmi ialino	X
		violetto	

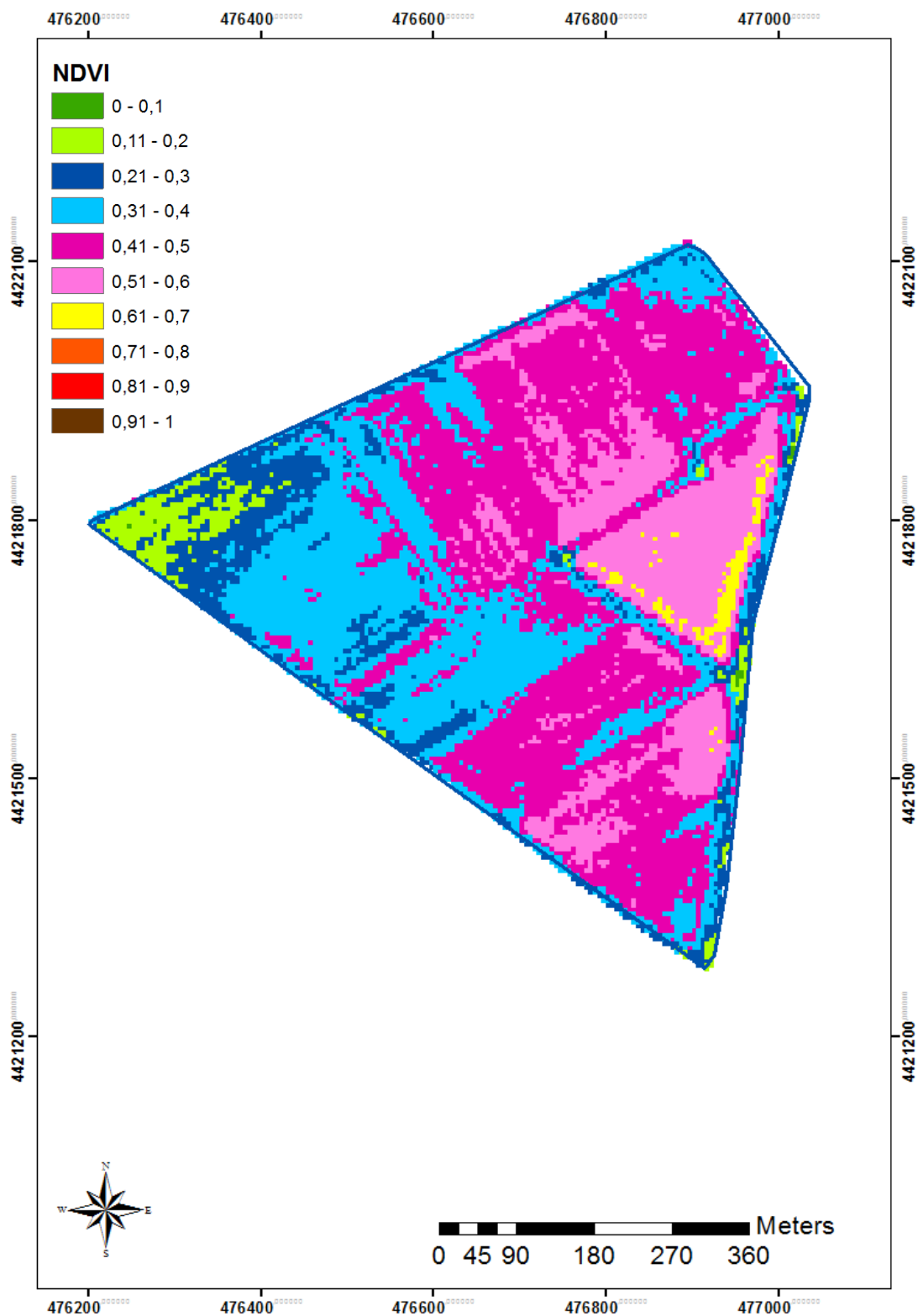
Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo
	<b>5</b>	<b>Glumella</b>	
	a	villosità	assente ----- X ----- presente
19	b	aristatura	mutica ----- X ----- corta ----- lunga
9	c	colore apice	apigmentato ----- pigmentato ----- X -----
7 e 8	d	colore carena e calotta	apigmentato ----- X ----- pigmentato
	e	colore glume	apigmentato ----- X ----- pigmentato
	<b>6</b>	<b>Spighetta</b>	
23	a	lunghezza (mm)	9,40
24	b	larghezza (mm)	2,00
22	c	peso 100 semi (g)	2,30
	<b>7</b>	<b>Cariosside</b>	
25	a	lunghezza (mm)	7,20
26	b	larghezza (mm)	1,80
27	c	rapporto L/l	4,00
		profilo arrotondato < 1,75	-----
		semiarrotondato 1,76-1,99	-----
		semiaffusolato 2,0 - 2,45	-----
		affusolato 2,46-3,00	-----
		lungo B > 3,00	X
	d	peso 100 semi (g)	1,90
28	e	colorazione pericarpo	bianco ----- X ----- colorato
	<b>8</b>	<b>Caratteri merceologici</b>	
29	a	cariosside: perlatura	presenza ----- assenza ----- X -----
	b	aroma	non aromatico ----- X ----- aromatico
30	c	endosperma: tipo	non glutinoso ----- X ----- glutinoso
	d	contenuto in amilosio % ss	alto
	e	consistenza kg / cm <sup>2</sup>	alta
	f	collosità g x cm	bassa
	<b>9</b>	<b>Cicli vegetativi</b>	
6	a	semina - spigatura (gg)	95
21	b	semina - maturazione (gg)	150
<b>NOTE:</b>			

SCHEDA DI ACCERTAMENTO DEI CARATTERI MORFOFISIOLOGICI			
Specie : <i>Oryza sativa</i>		Denominazione: <b>Volano</b>	
Paese di origine: Italia			
Genealogia: St. 401 x Rizzotto			
Responsabile della conservazione in purezza:		S.I.S.	Introduzione: 1972
Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo
	<b>1</b>	<b>Foglia</b>	
2	a	colore verde pigmentato	X
		portamento eretta	
	b	intermedia	X
		orizzontale riflessa	
	<b>2</b>	<b>Culmo</b>	
12	a	taglia (cm)	110,0
11	b	diametro culmo (mm)	4,94
13	c	colore nodi verde pigmentato	X
		colore internodi verde pigmentato	X
	e	colore guaina verde pigmentato	X
		colore giuntura verde pigmentato	X
	f	colore auricole verde pigmentato	X
		<b>3</b>	<b>Foglia paniculare</b>
	a	portamento eretta intermedia orizzontale riflessa	X
	<b>4</b>	<b>Pannocchia</b>	
	a	lunghezza (cm)	22,0
15	b	tipo compatta	
		intermedia	
		aperta	X
	c	eserzione molto eserta	X
eserta inguainata			
d	portamento eretta		
	semieretta		
	semipendula		
	pendula	X	
20	e	aristatura mutica	X
		semimutica	
		semiaristata	
		aristata	
10	f	colore stigmi ialino	X
		violetto	

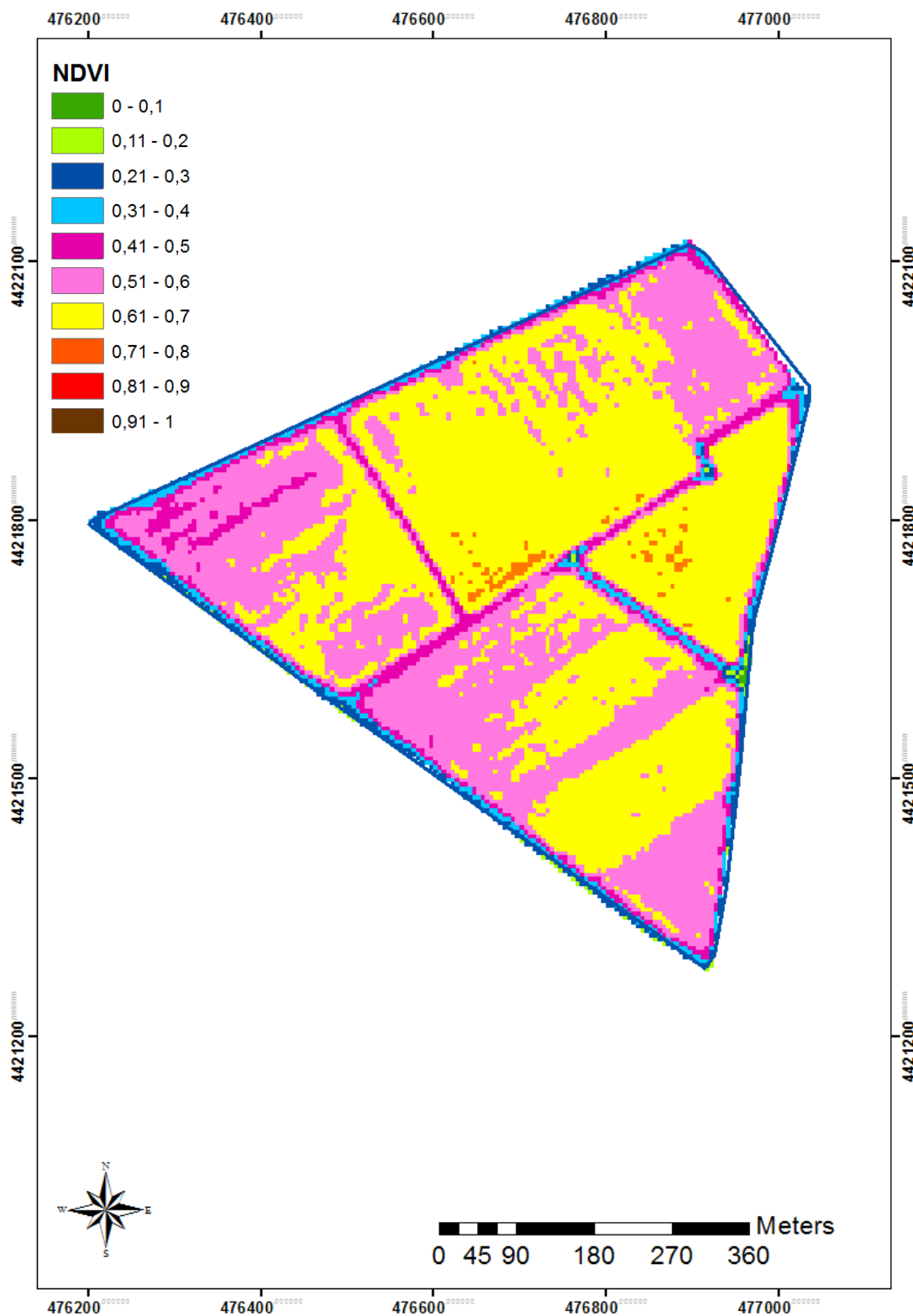
Codice UPOV	Gruppo di caratteri	Carattere	Rilievo
	<b>5</b>	<b>Glumella</b>	
	a	villosità	assente presente X
19	b	aristatura	mutica X corta lunga
9	c	colore apice	apigmentato X pigmentato
7 e 8	d	colore carena e calotta	apigmentato X pigmentato
	e	colore glume	apigmentato X pigmentato
	<b>6</b>	<b>Spighetta</b>	
23	a	lunghezza (mm)	9,89
24	b	larghezza (mm)	4,23
22	c	peso 100 semi (g)	4,64
	<b>7</b>	<b>Cariosside</b>	
25	a	lunghezza (mm)	7,27
26	b	larghezza (mm)	3,65
27	c	rapporto L/A	1,99
		profilo	arrotondato < 1,75 semiarrotondato 1,76-1,99 X semiaffusolato 2,0 - 2,45 affusolato 2,46-3,00 lungo B > 3,00
	d	peso 100 semi (g)	3,80
28	e	colorazione pericarpo	bianco X colorato
	<b>8</b>	<b>Caratteri merceologici</b>	
29	a	cariosside: perlatura	presenza X assenza
	b	aroma	non aromatico X aromatico
30	c	endosperma: tipo	non glutinoso X glutinoso
	d	contenuto in amilosio % ss	17,40
	e	consistenza kg / cm <sup>2</sup>	0,76
	f	collosità g x cm	2,61
	<b>9</b>	<b>Cicli vegetativi</b>	
6	a	semina - spigatura (gg)	100
21	b	semina - maturazione (gg)	155
<b>NOTE:</b>			



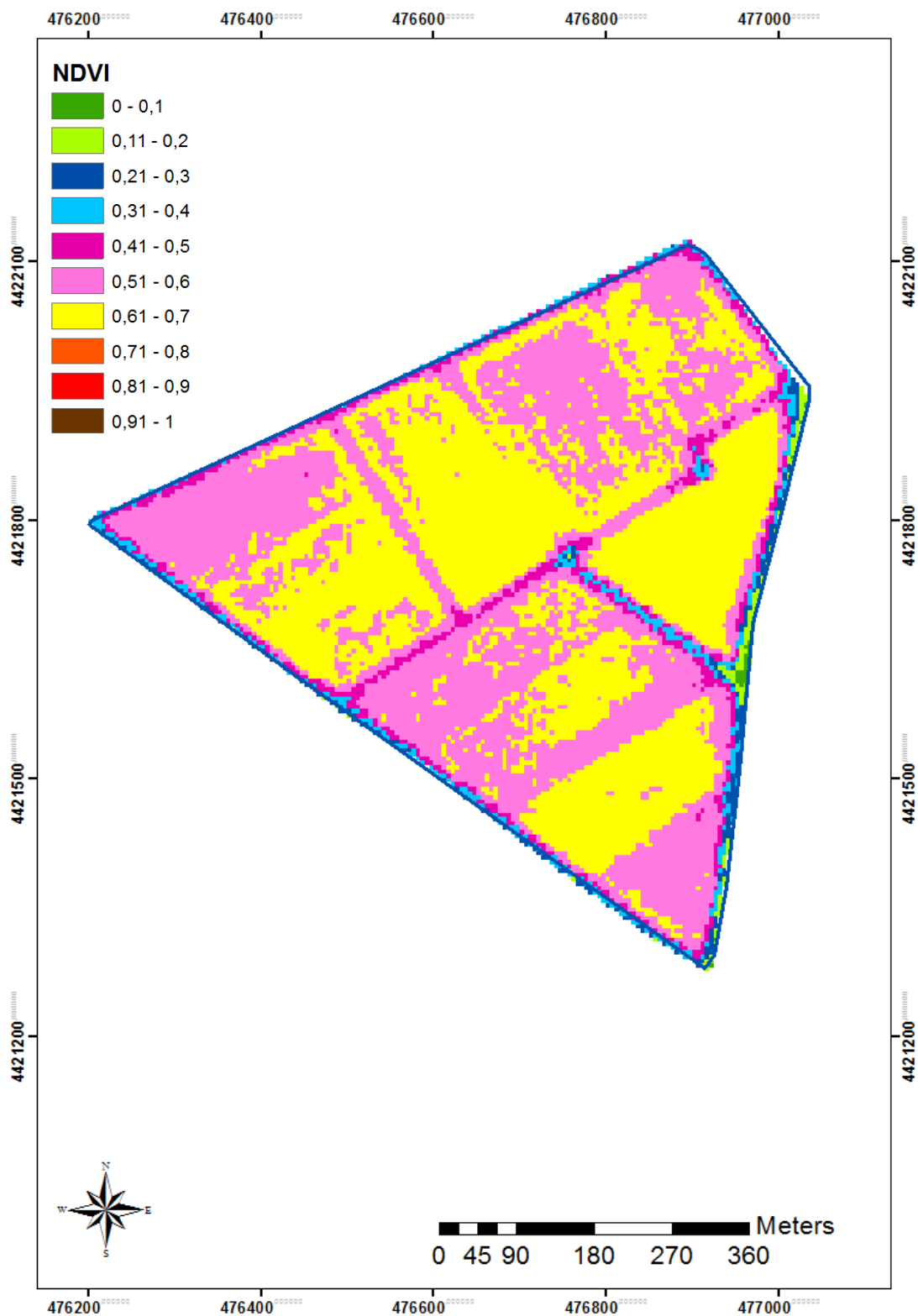
### Mappa NDVI 2 Luglio 2010



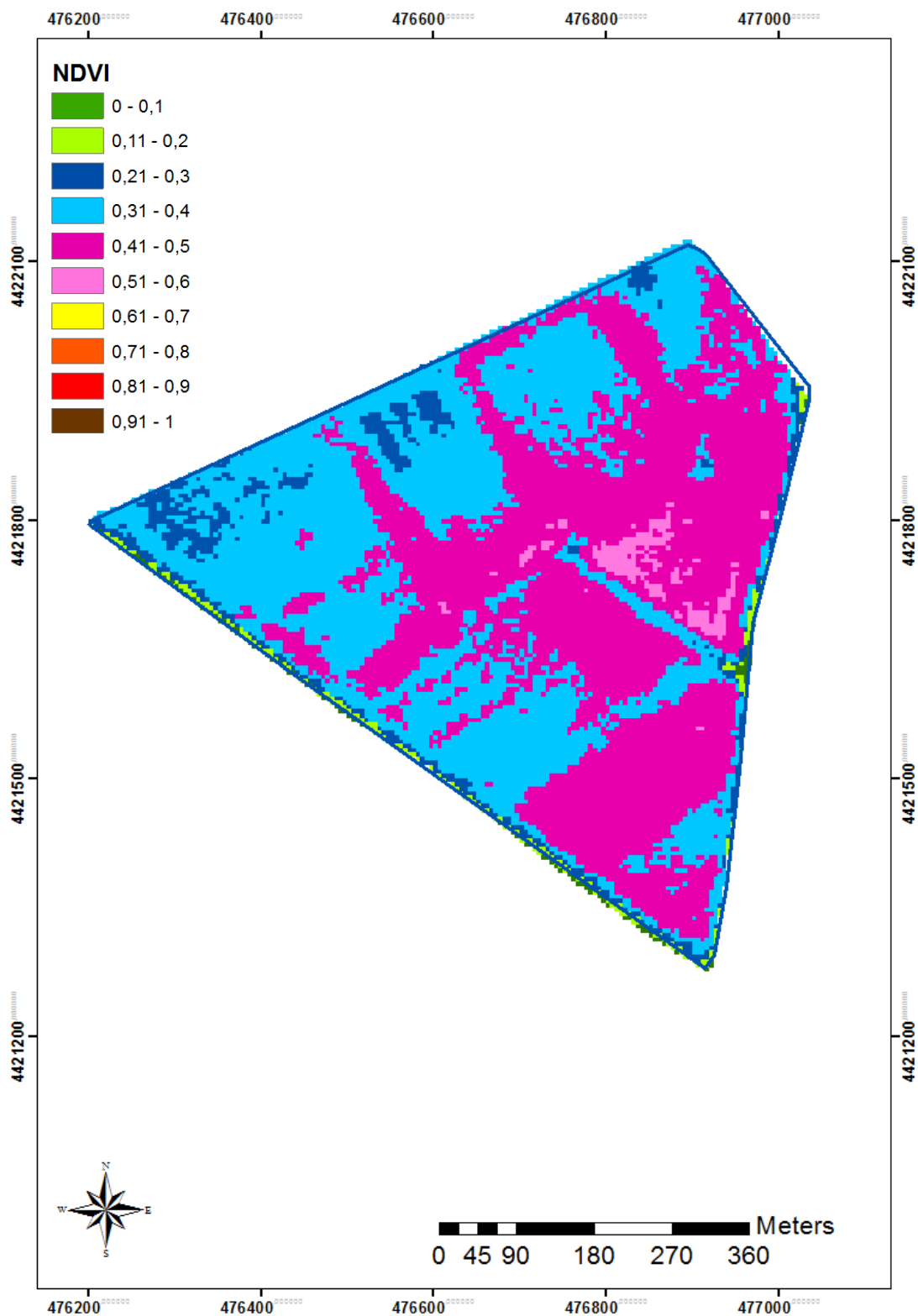
### Mappa NDVI 28 Luglio 2010



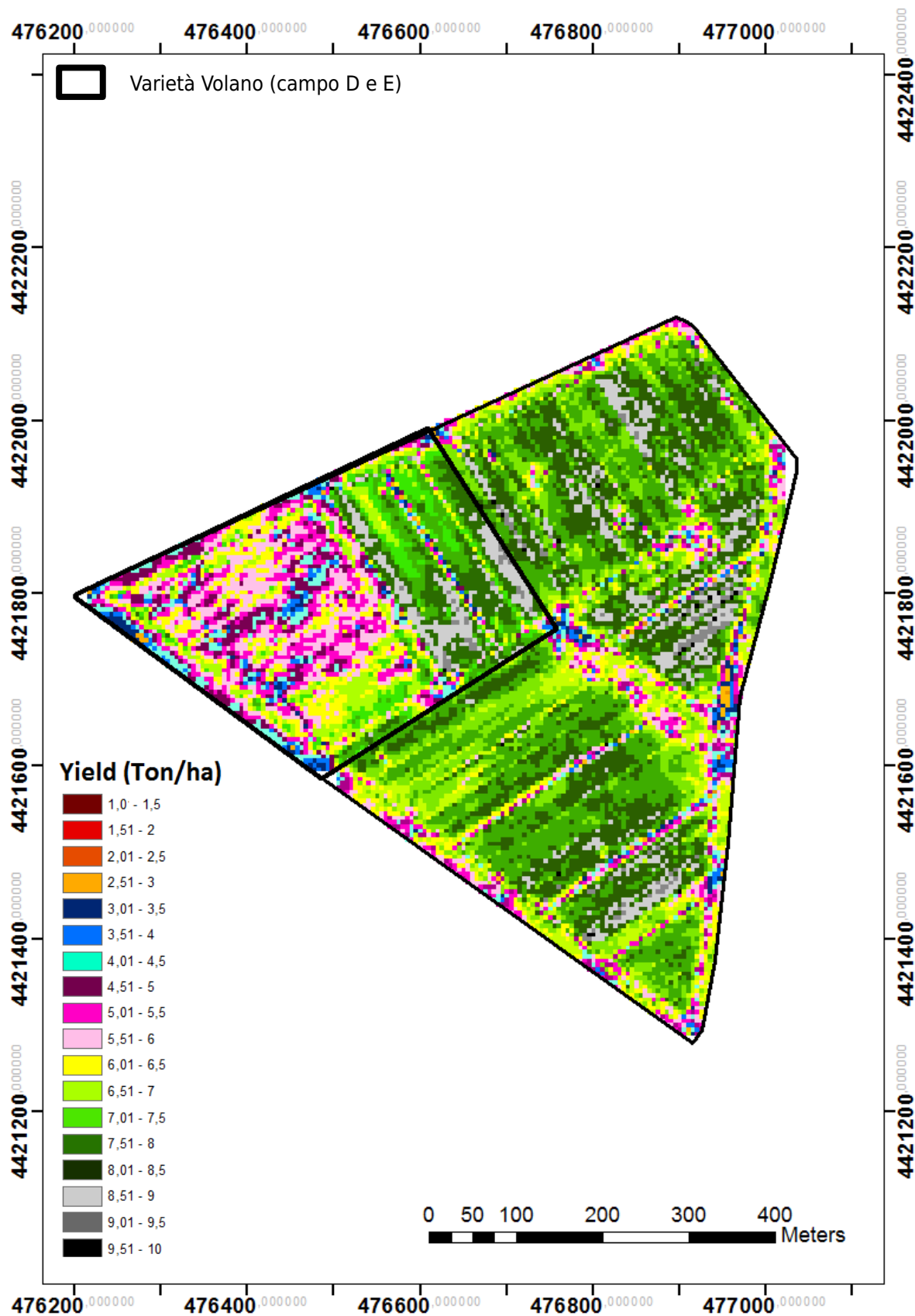
### Mappa NDVI 15 Agosto 2010



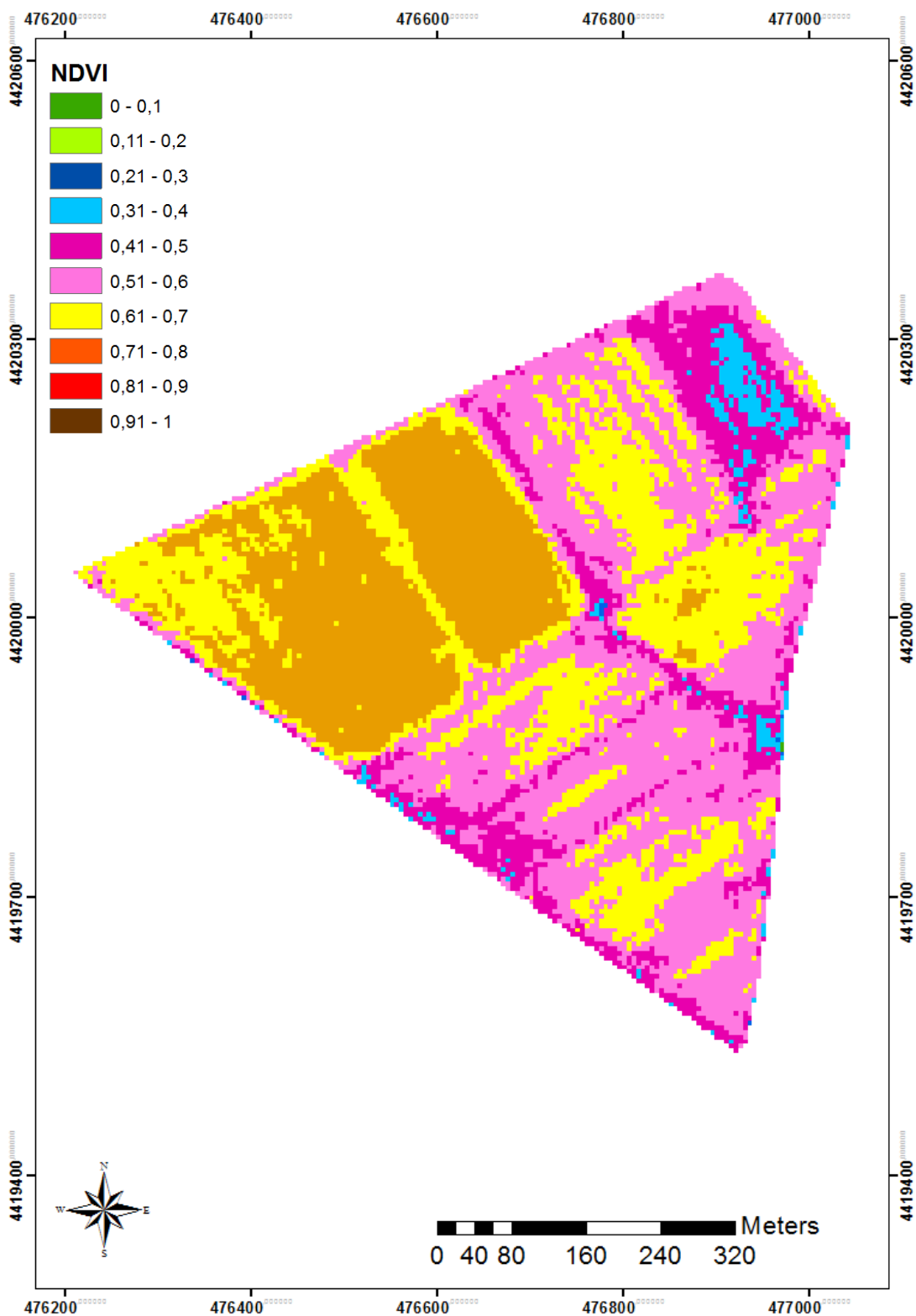
### Mappa NDVI 10 Settembre 2010



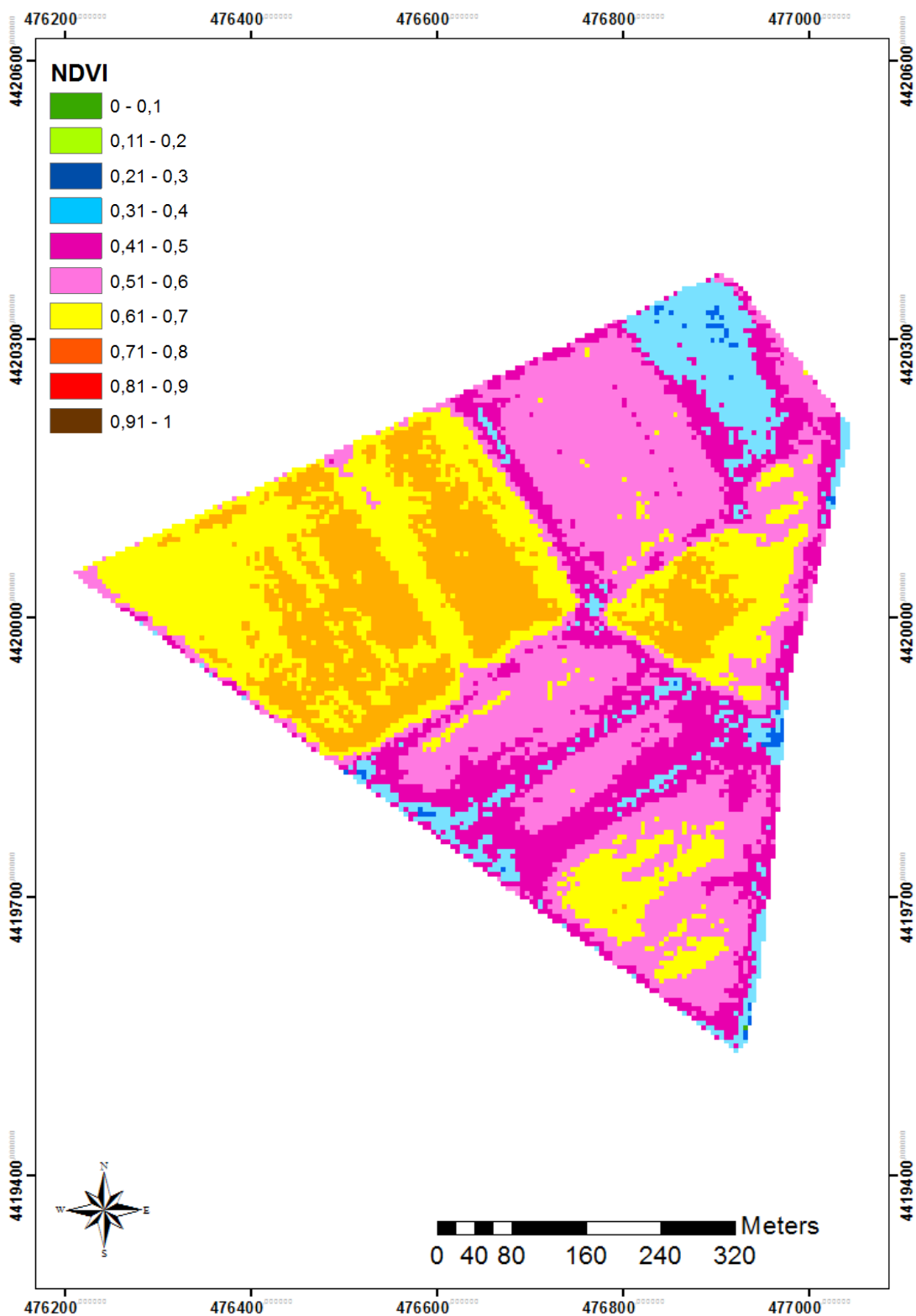
### Mappa delle produzioni 2010



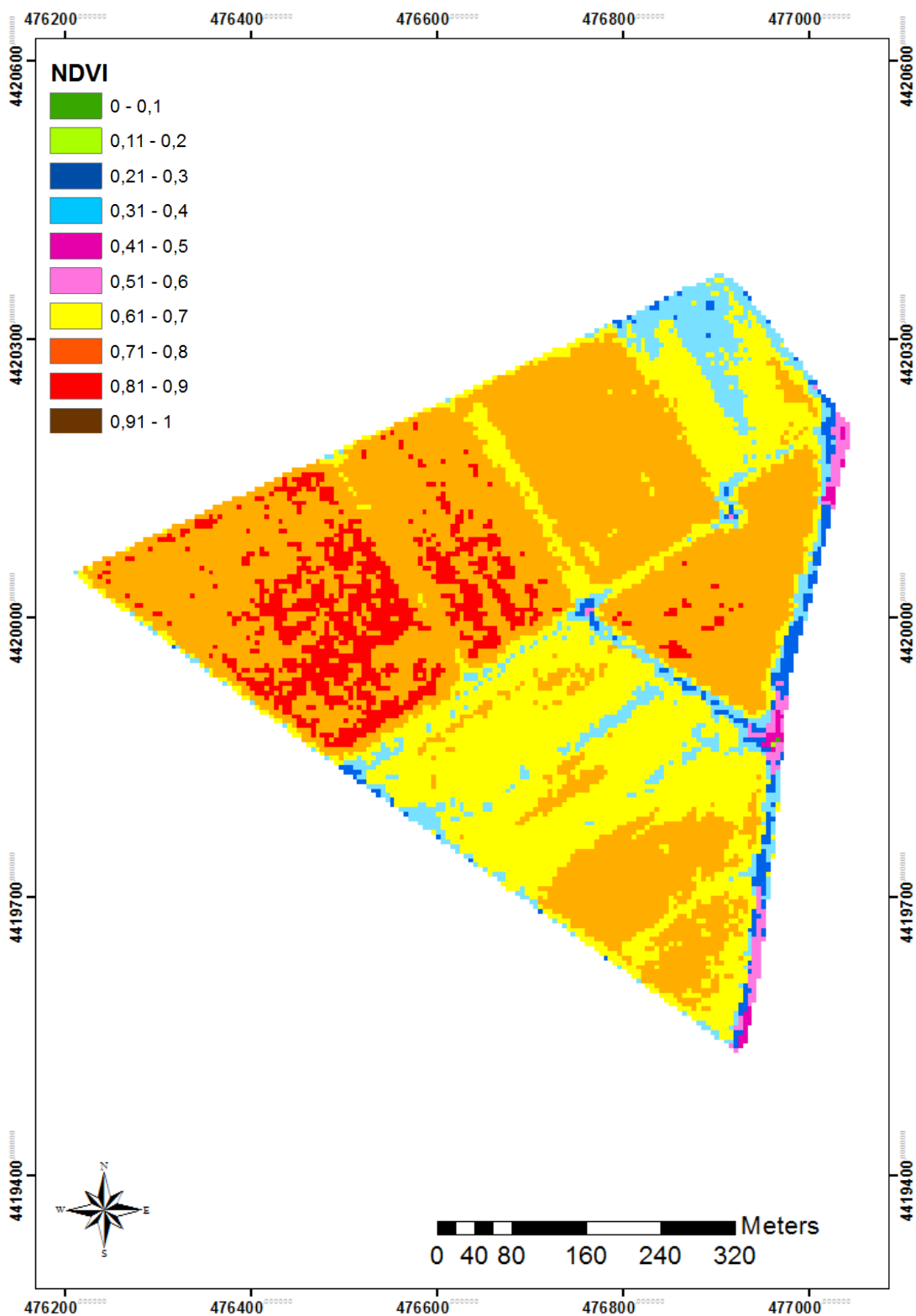
### Mappa NDVI 26 Giugno 2011



### Mappa NDVI 5 Luglio 2011

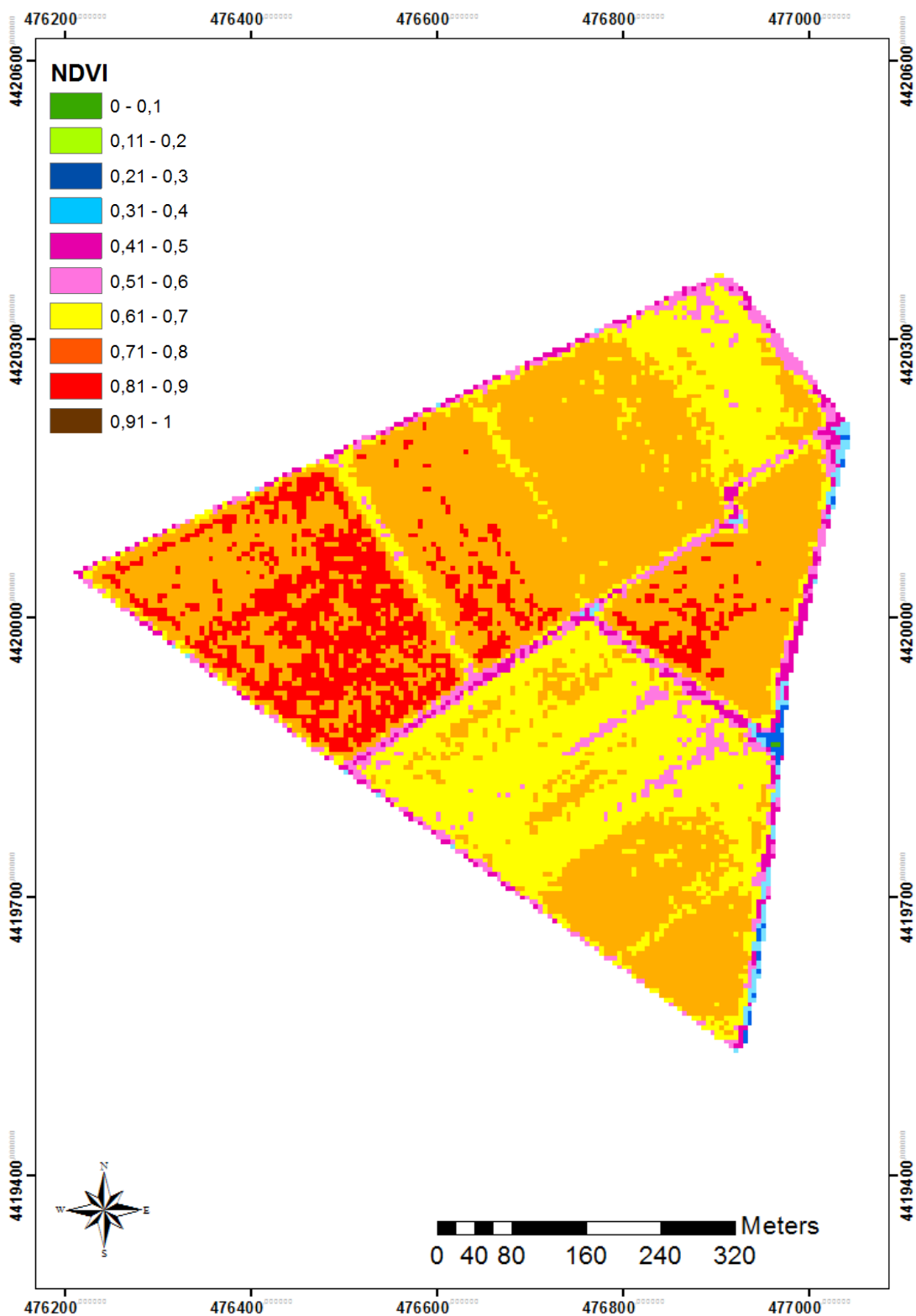


### Mappa NDVI 16 Luglio 2011

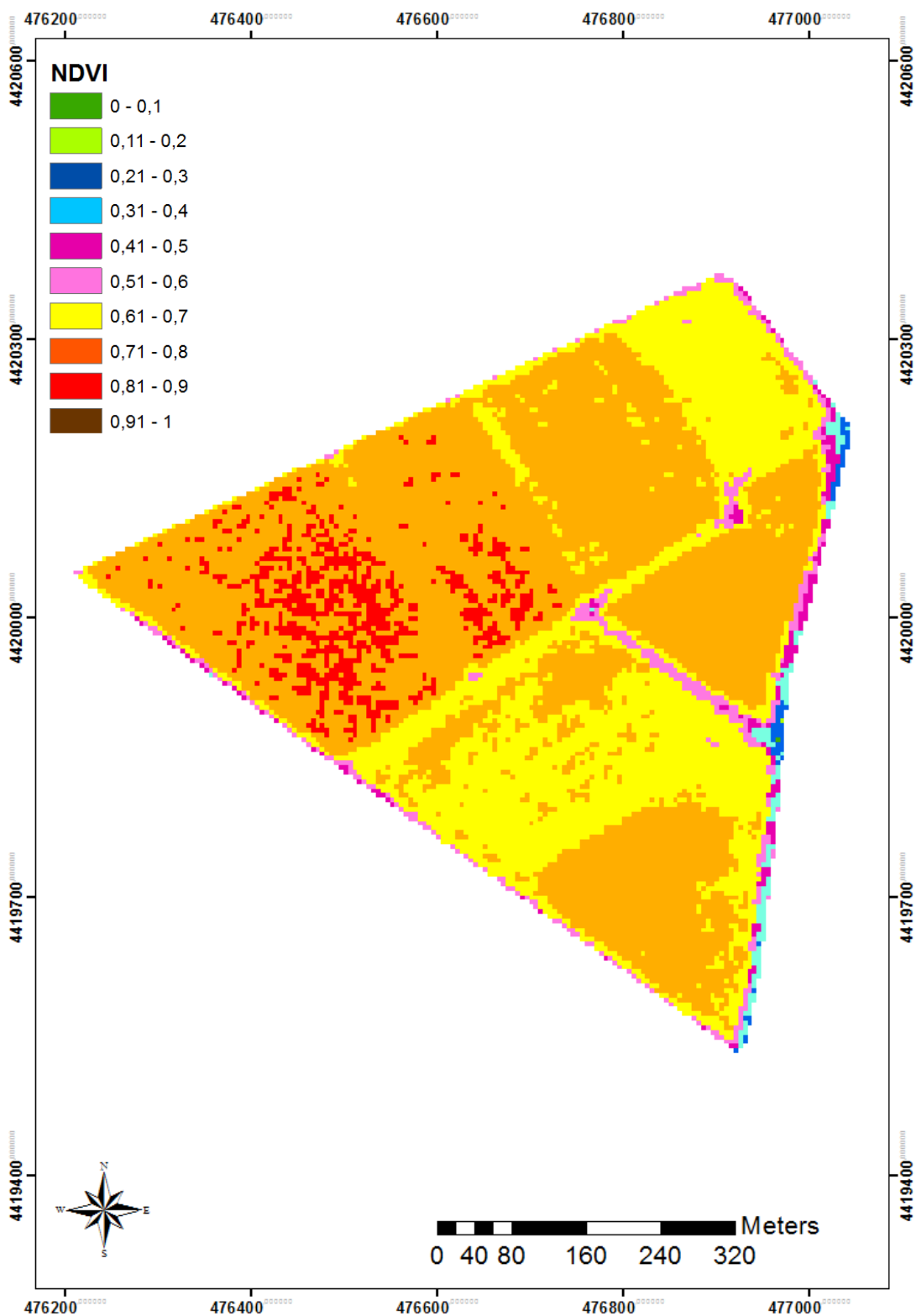




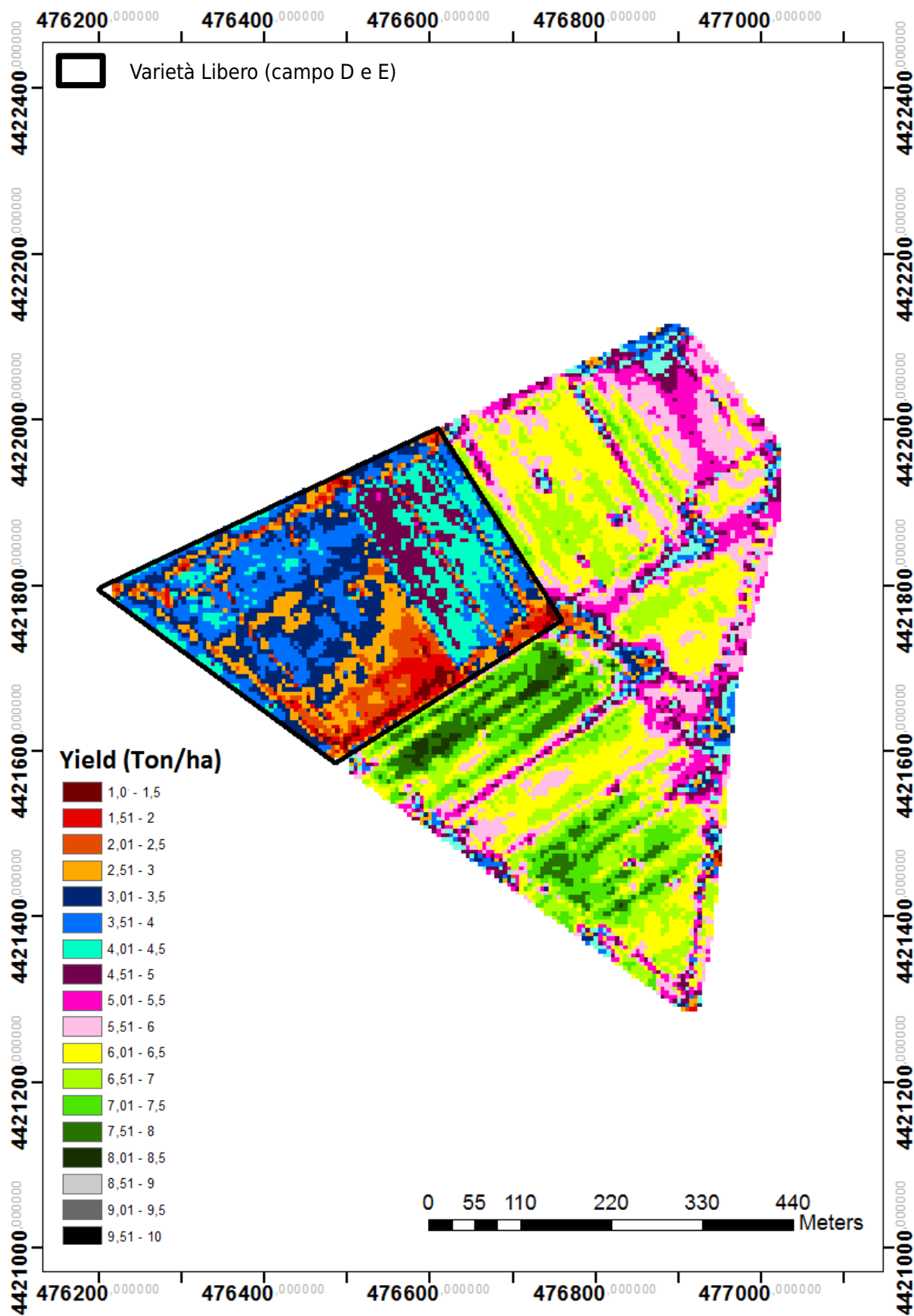
### Mappa NDVI 28 Luglio 2011



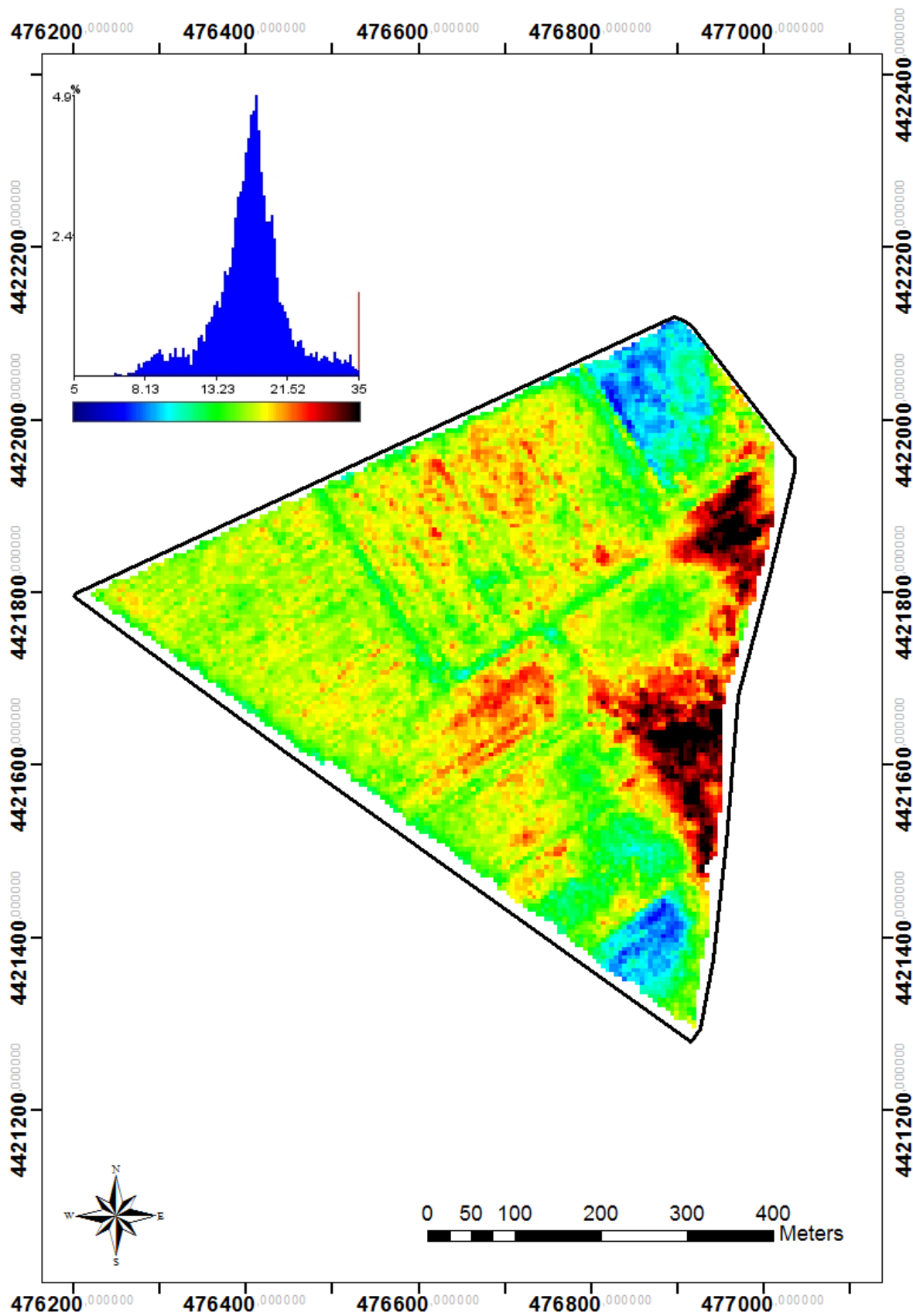
### Mappa NDVI 20 Agosto 2011



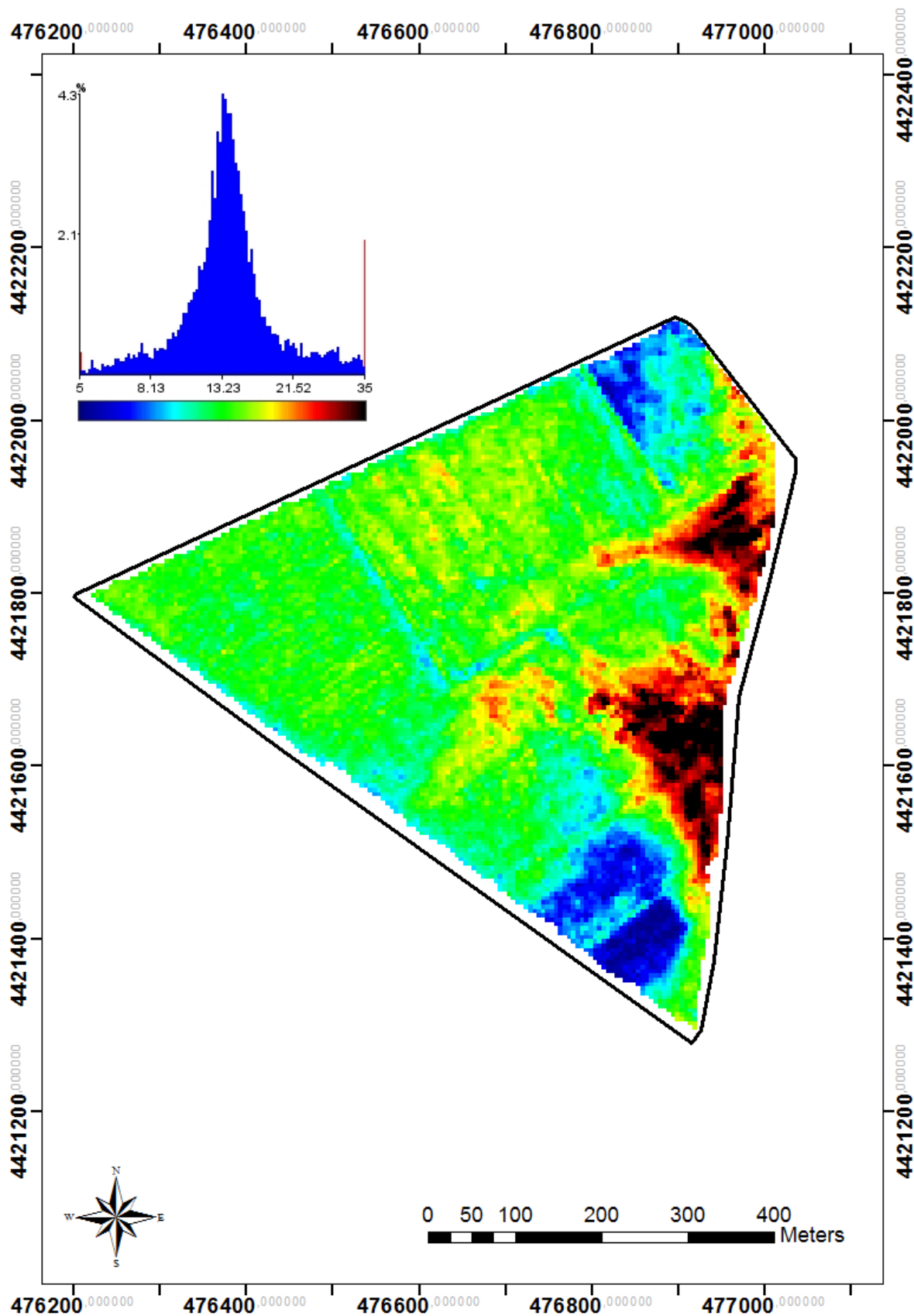
### Mappa delle produzioni 2011



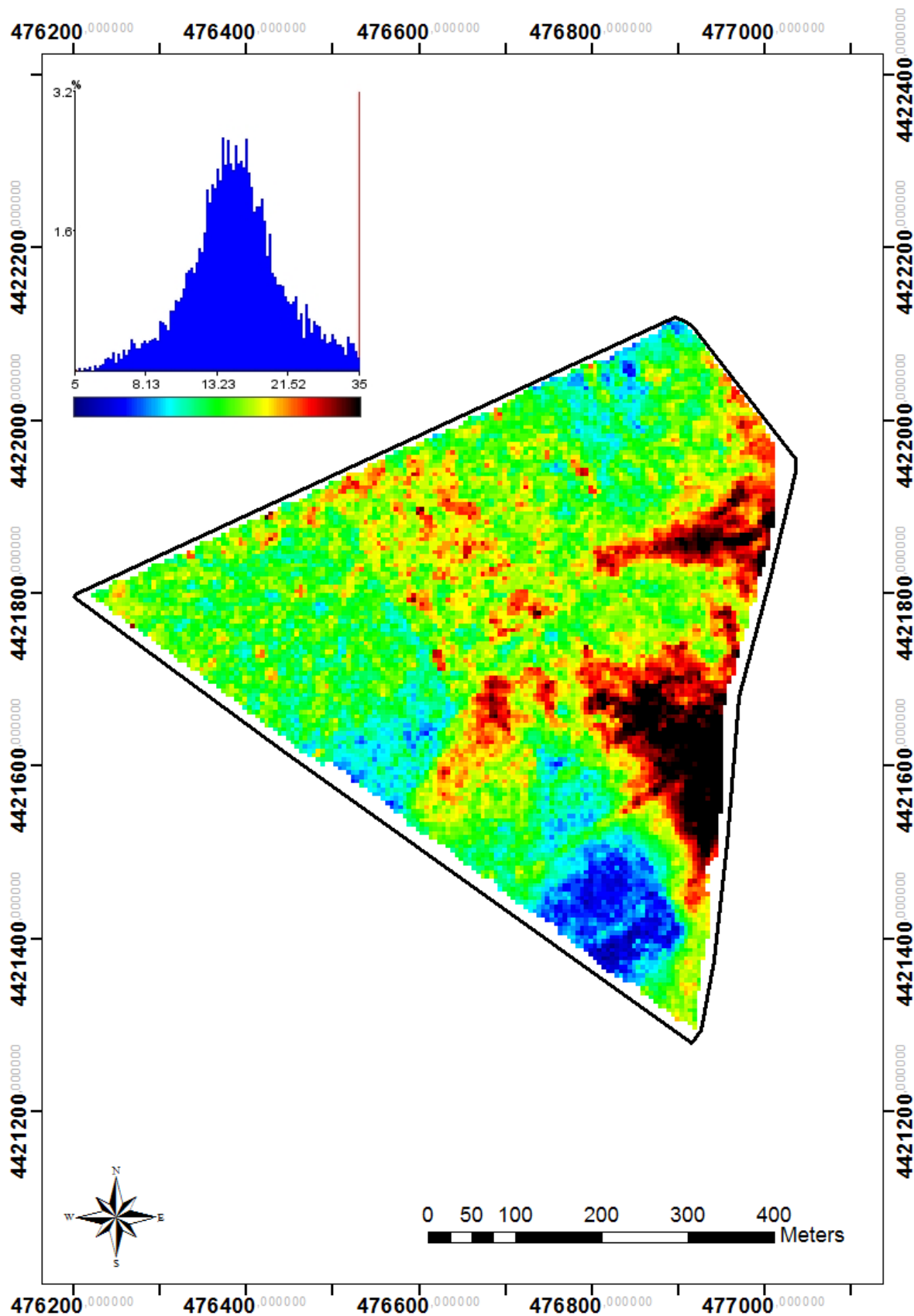
### Mappa di georesistività: strato 0-0.5 m



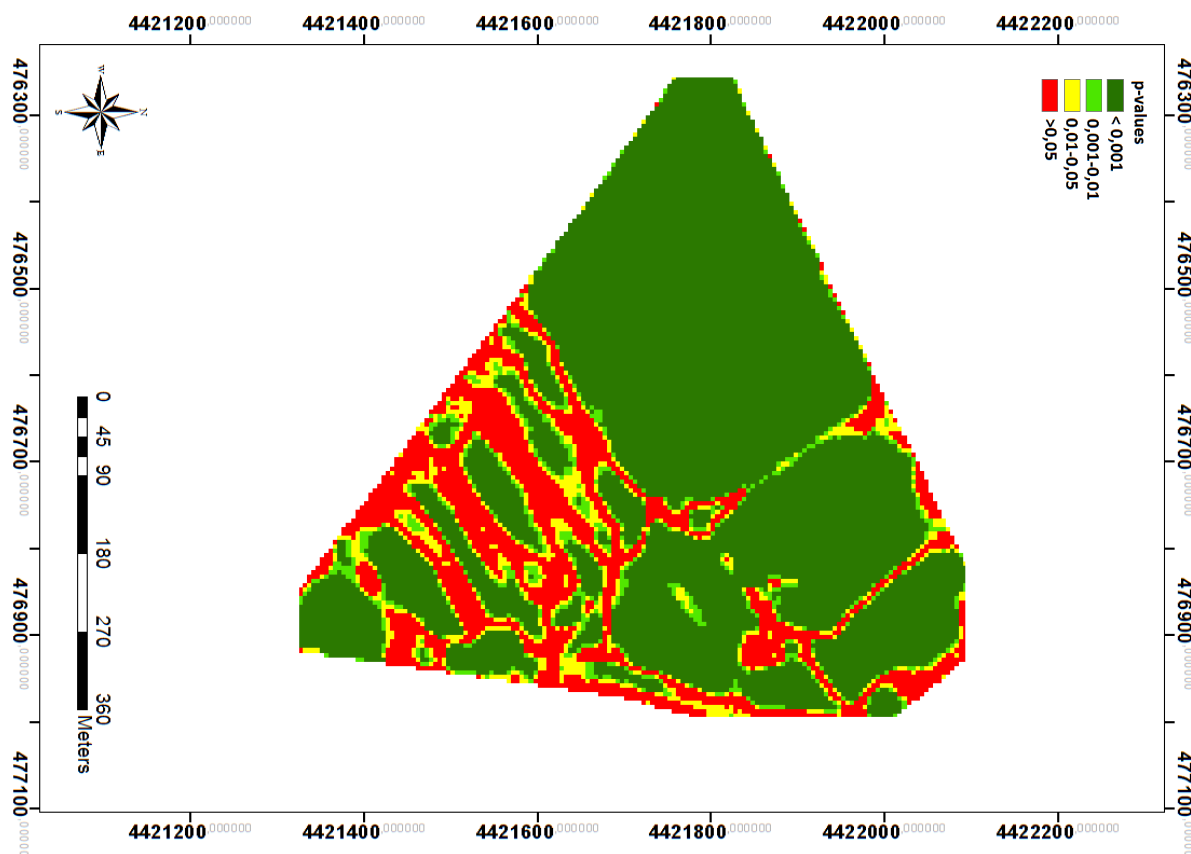
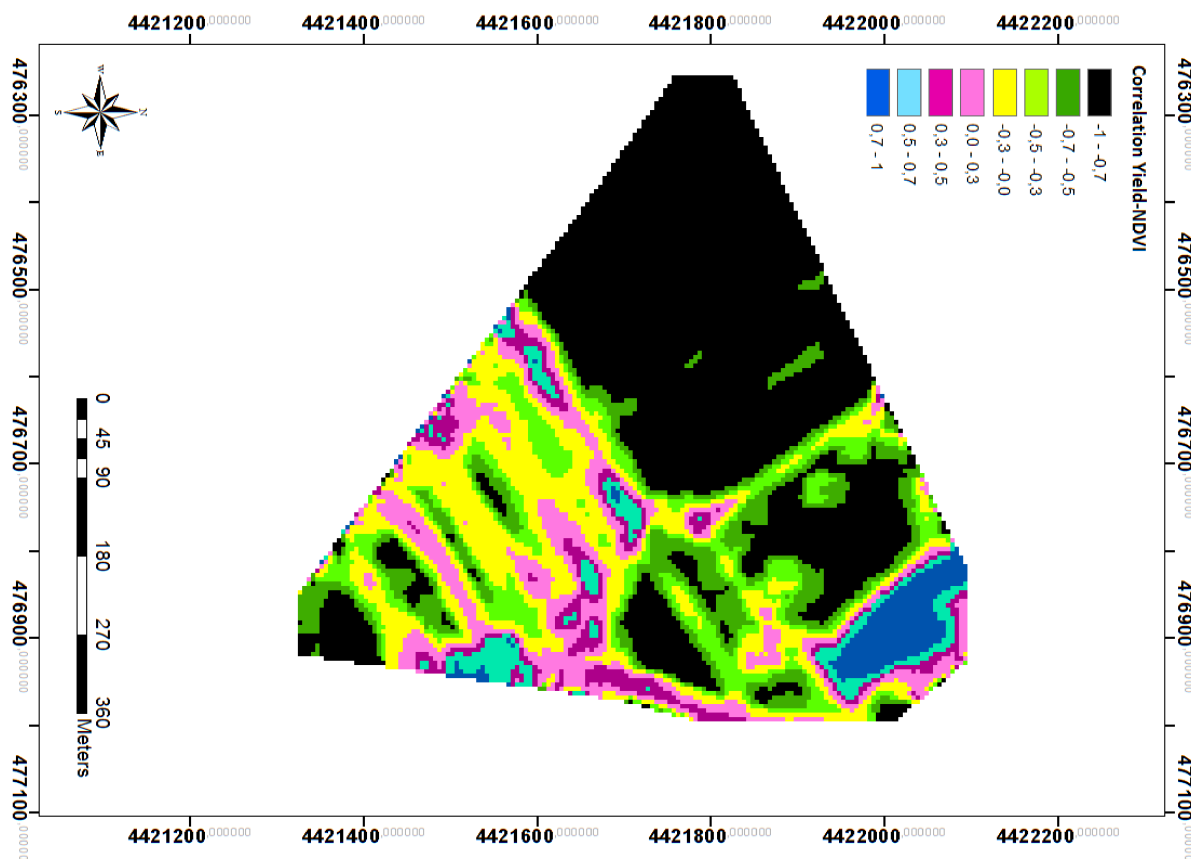
### Mappa di georesistività: strato 0.5-1 m



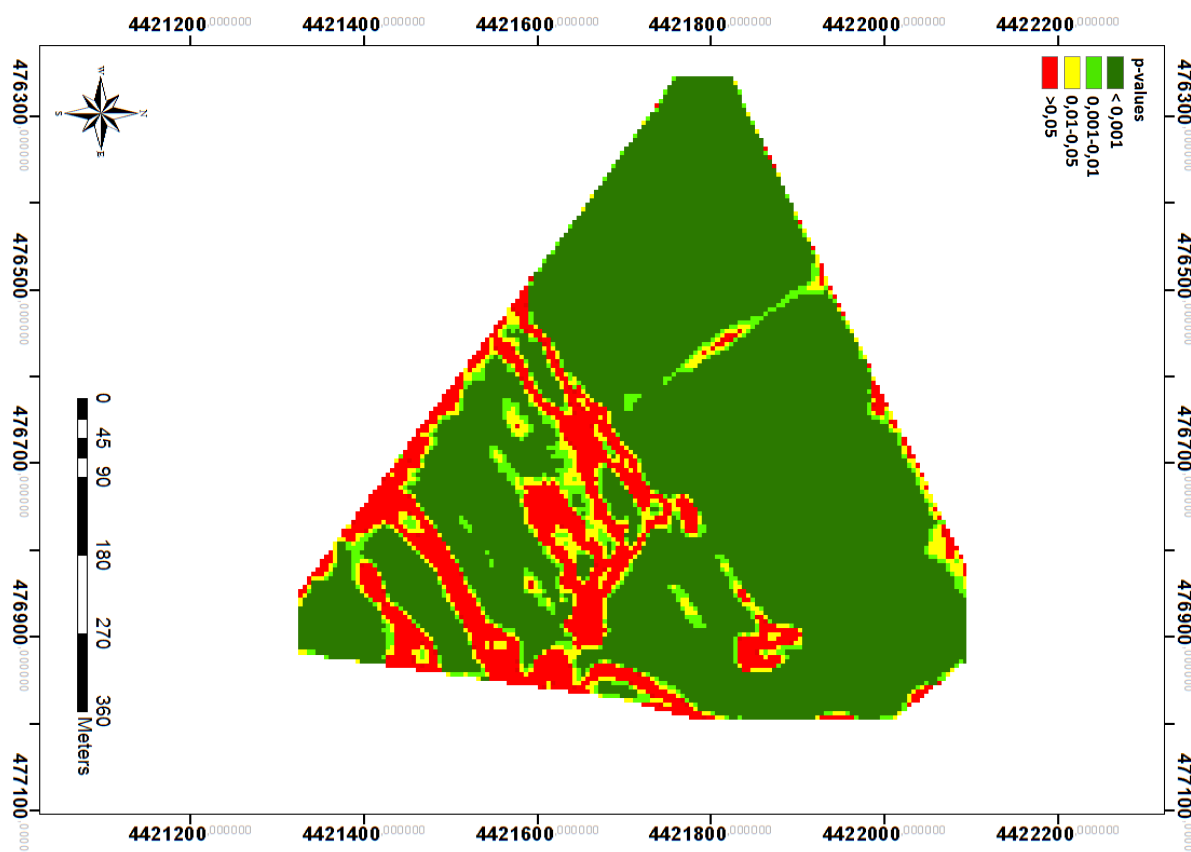
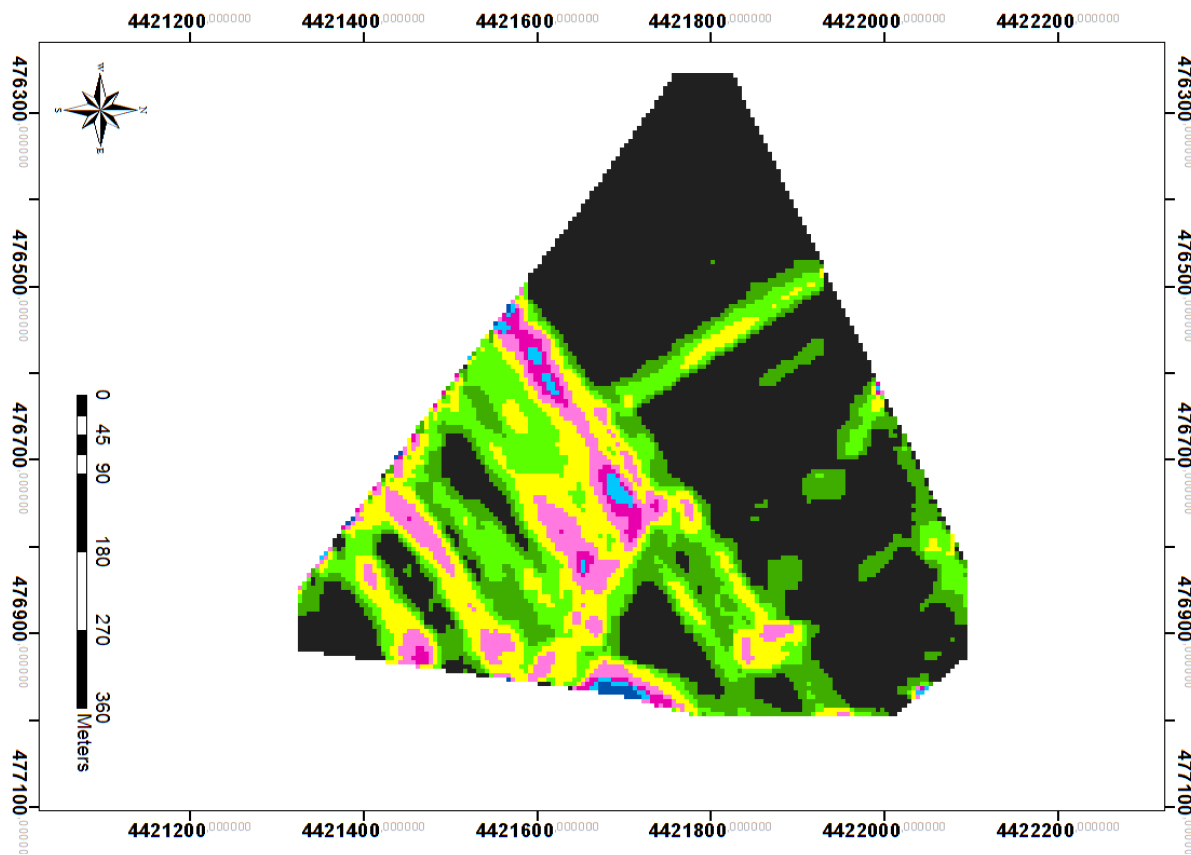
### Mappa di georesistività: strato 1-1.8 m



### Mappa di correlazione Produzione – NDVI 47 DAS 2010 e NDVI 43 DAS 2011

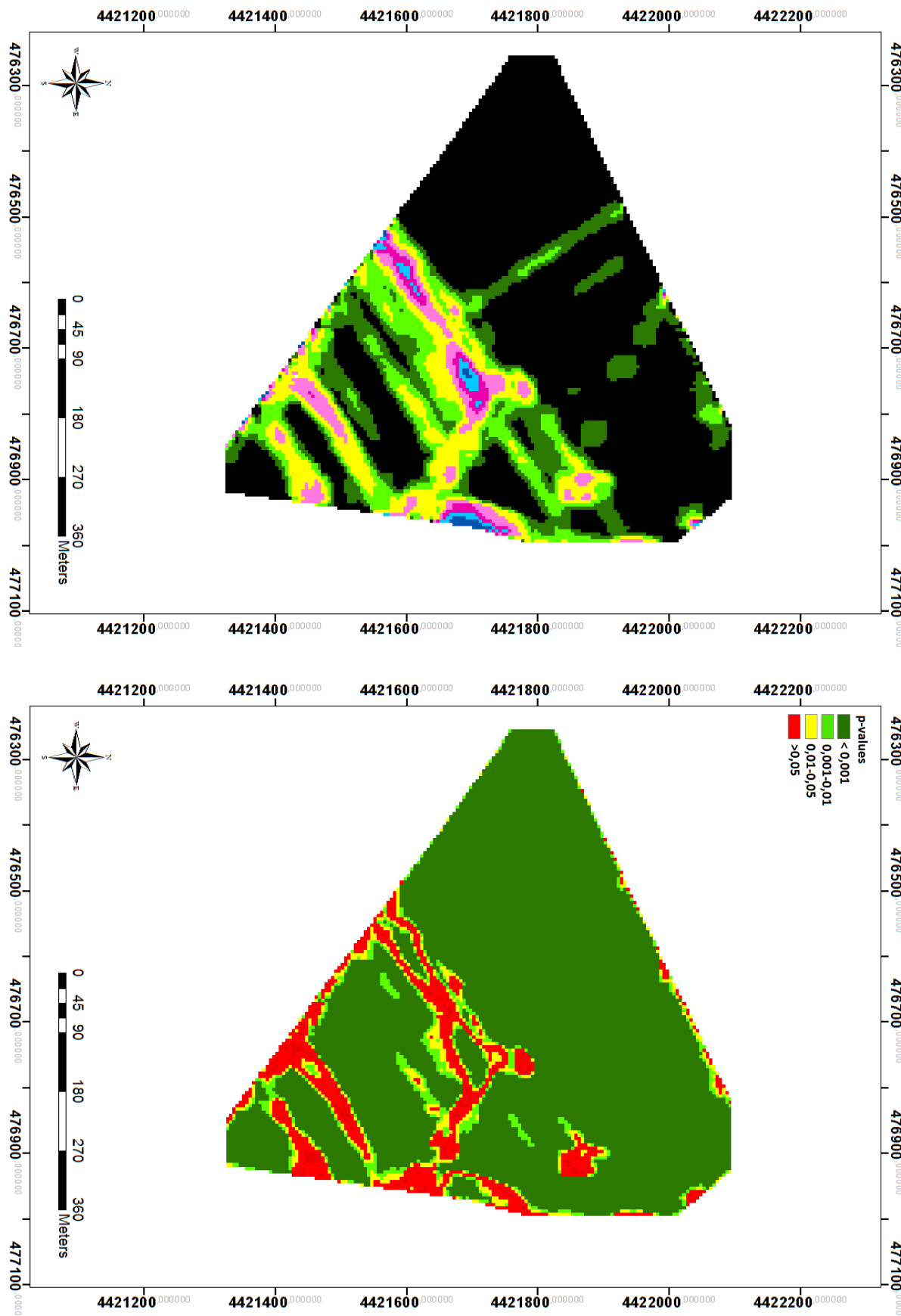


### Mappa di correlazione Produzione – NDVI 73 DAS 2010 e NDVI 75 DAS 2011





### Mappa di correlazione Produzione – NDVI 91 DAS 2010 e NDVI 98 DAS 2011



### Zonazione della produzione

