

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

(Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali)

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

TESI DI LAUREA

in

TECNICHE DI RILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEL TERRITORIO M

**CONFRONTO TRA DATI TELERILEVATI AD ALTA E MEDIA
RISOLUZIONE GEOMETRICA (WORLDVIEW E ASTER) PER LO
STUDIO DEGLI EFFETTI DELL' INTRUSIONE SALINA SULLA
VEGETAZIONE**

CANDIDATO
Lorenzo Pancioli

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Maurizio Barbarella

CORRELATORE
Ing. Michaela De Giglio

Anno Accademico 2012/13

Sessione III

Indice

Introduzione.....	1-5
Capitolo 1 PRINCIPALI ASPETTI DEL TELERILEVAMENTO.....	1-7
1.1 Cenni di telerilevamento.....	1-7
1.1.1 Le risoluzioni del dato telerilevato da satellite .	1-10
1.2 Comportamento spettrale della vegetazione.....	1-15
1.2.1 Indici della vegetazione	1-22
Capitolo 2 I DATI SATELLITARI.....	2-27
2.1 Aster.....	2-27
2.2 WorldView-2.....	2-34
2.2.1 Le nuove bande di WV-2	2-39
Capitolo 3 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO.....	3-47
3.1 La pineta di San Vitale.....	3-47
3.1.1 La vegetazione nella pineta	3-52
3.2 L'intrusione di acqua salata e i suoi effetti sulla vegetazione	3-54
3.2.1 Monitoraggio della salinità	3-56
3.2.2 Effetti della salinità sulla vegetazione	3-58
Capitolo 4 METODOLOGIA.....	4-61
4.1 Preprocessing.....	4-63
4.2 Elaborazione del dato satellitare.....	4-70
4.3 Isosaline.....	4-77
Capitolo 5 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI.....	5-79
5.1 Salinità.....	5-79
5.2 NDVI: confronto tra Aster e WV-2.....	5-83
5.2.1 Anomalia nei valori assoluti di NDVI nel dato Aster del 27/05/2011.....	5-86
5.2.2 Correlazione tra NDVI e salinità	5-91
5.3 NDVI con le nuove bande del dato in WV-2.....	5-92
5.3.1 Correlazione tra nuovi NDVI e salinità	5-96
5.4 Approfondimenti statistici.....	5-98
Capitolo 6 ULTERIORI ELABORAZIONI NEL DATO WORLDVIEW-2.....	6-113
6.1 Metodologia.....	6-113

6.2	Indice NDVI: N1R-W.....	6-119
6.2.1	Correlazione tra NDVI e salinità per le SUB-ROI NON PINO	6-123
6.3	Nuovo indice NDVI: N1RE.....	6-125
6.4	Correlazione N1RE e salinità per le SUB-ROI NON PINO.	6-129
6.5	Indice DATT.....	6-131
6.5.1	Correlazione tra DATT e salinità per le SUB-ROI NON PINO	6-135
6.6	Approfondimenti statistici.....	6-136
Capitolo 7	CONCLUSIONI.....	7-147
	Ringraziamenti.....	7-151
	Bibliografia.....	7-153
	Sitografia	7-156

Introduzione

Il fenomeno dell'intrusione di acqua salata all'interno dell'acquifero sottostante le pinete in provincia di Ravenna (Emilia-Romagna, Italia) e l'intero sistema costiero che le circonda è noto.

Le cause di questo fenomeno sono sia di tipo antropico, sfruttamento intensivo della falda acquifera e aumento della domanda idrica; sia naturale, infatti gran parte dell'area è situata sotto il livello del mare e il fenomeno della subsidenza caratterizza la zona.

In queste aree sono state realizzate molteplici campagne di campionamento a terra per accertare e monitorare il fenomeno, che ha causato una progressiva degradazione delle aree boschive presenti.

Studi precedenti (Avantaggiato,2011) e (Barbarella et al.2013) hanno sviluppato una procedura, basata su dati satellitari multispettrali a media risoluzione spaziale, Aster, per individuare aree di vegetazione sottoposta a condizioni di stress causato dalla salinizzazione delle acque sotterranee. In questi studi la procedura è stata applicata a due aree boschive ravennati: la pineta di Classe e la pineta di San Vitale.

L'analisi sfrutta le variazioni riconoscibili nelle diverse bande spettrali indotte dal cambiamento di proprietà delle piante maggiormente colpite dal fattore di stress; queste variazioni, riscontrate negli intervalli di lunghezze d'onda relativi alle bande RED e NIR, si manifestano col cambiamento dei valori dell'indice di vegetazione NDVI, che si ottiene dalla combinazione algebrica dei valori di riflettanza acquisiti nelle due bande.

Nel seguente studio si vogliono confrontare i risultati e le informazioni ottenibili applicando la procedura di analisi sia a dati multispettrali Aster a media risoluzione spaziale (15m), sia a dati multispettrali WorldView-2 ad alta risoluzione geometrica (2m).

Il dato ad alta risoluzione WorldView-2 presenta anche una maggior risoluzione spettrale acquisendo otto bande nell'intervallo dello spettro elettromagnetico comprendente il visibile e il vicino infrarosso, a differenza del dato Aster che ne sfrutta solamente tre, nel sottosistema VNIR considerato. Tra le nuove bande presenti nel sensore WorldView-2 quella denominata RED-EDGE ricade nell'omonimo intervallo dello spettro elettromagnetico dove la firma spettrale

della vegetazione risulta essere fortemente influenzata dallo stato di salute della pianta, come riscontrato in studi passati relativi all'utilizzo dello spettroradiometro. Di conseguenza la nuova banda permette di estendere l'applicazione di differenti indici della vegetazione, tipici di analisi con spettroradiometro, al dato WorldView-2, oltre all'indice NDVI ottenuto dalla combinazione delle bande classiche del RED e del NIR.

Il primo obiettivo dello studio è verificare se si manifesta riscontro tra i risultati ottenuti con i dati a media e ad alta risoluzione spaziale, e valutarne rispettivamente il riscontro con la condizione di stress, dovuta all'intrusione salina nell'acquifero sottostante accertata e valutata tramite campagne di campionamento a terra, a cui è sottoposta la vegetazione nell'area.

In secondo luogo si vuole stabilire il contributo fornito, nell'analisi dello stato di salute della vegetazione, dalla maggior risoluzione spettrale attraverso la presenza delle nuove bande (COASTAL, YELLOW, RED-EDGE e NIR2) nel dato WorldView-2 e dei conseguenti nuovi indici della vegetazione ottenibili. La maggior risoluzione spettrale, inoltre fornisce la possibilità di nuove modalità di visualizzazione RGB del dato, consentendo la creazione di differenti e alternative immagini a falsi colori per l'individuazione a video delle caratteristiche dell'area inquadrata.

Di conseguenza lo scopo finale dello studio è stabilire se i vantaggi forniti dall'alta risoluzione spaziale e dalla maggior risoluzione spettrale giustificano l'elevata spesa per l'acquisto del dato, rispetto al vantaggio economico dovuto all'utilizzo dei dati a media risoluzione geometrica e con minor risoluzione spettrale. Questa valutazione deve essere fatta non in relazione all'utilizzo di una singola immagine, ma all'interno di una campagna di monitoraggio multitemporale che richiede l'analisi di una successione di dati relativi alla stessa area di studio.

L'area boschiva oggetto dello studio svolto è la pineta di San Vitale e i dati analizzati, Aster e WorldView-2, sono correlati temporalmente, ovvero tutti acquisiti nella seconda metà del mese di Maggio.

1 PRINCIPALI ASPETTI DEL TELERILEVAMENTO

1.1 Cenni di telerilevamento

Con il termine Telerilevamento si indica l'insieme delle tecniche per l'acquisizione e la misura di informazioni, relative alle proprietà di un oggetto, attraverso l'uso di strumenti di registrazione posti non a stretto contatto fisico con l'oggetto stesso; nel caso del telerilevamento da satellite si parla di remote sensing, in quanto la distanza è nell'ordine delle migliaia di chilometri.

Tutti gli strumenti da ripresa, in gergo tecnico, vengono chiamati *sensori*; nel caso del telerilevamento da satellite i sensori utilizzati sono sistemi scanner che registrano i dati in forma digitale, acquisendo le lunghezze d'onda relative a una determinata parte dello spettro elettromagnetico, e li restituiscono come dati raster.

Le immagini raster sono formate da un insieme di pixel, ordinati secondo righe e colonne, tali da costruire una matrice di valori in funzione della radiazione elettromagnetica misurata sull'area di terreno corrispondente; quindi un'immagine digitale è costituita da una matrice di pixel, elementi discreti corrispondenti alla cella di risoluzione al suolo, ad ognuno dei quali è associato un numero intero positivo Digital Number(DN), rappresentativo della energia radiante emessa o riflessa, e una coppia di coordinate immagine(X;Y).

Tale tecnica permette dunque la conoscenza e l'individuazione di caratteristiche della materia attraverso la misura della radiazione elettromagnetica, fornendo informazioni qualitative e quantitative relative alle superfici riprese.

Normalmente il rilievo di una superficie effettuato con tecniche di telerilevamento prevede tre fasi distinte: ripresa dei dati(da terra, da aereo o da satellite), elaborazione dei dati e interpretazione dei dati.

Il risultato finale di un'operazione di telerilevamento è, nella maggior parte dei casi, la produzione di una mappa tematica assegnando un codice di categoria a ogni pixel dell'immagine rilevata. Di conseguenza in tali carte una generica superficie viene suddivisa in

aree dal comportamento omogeneo rispetto a determinate caratteristiche analizzate.

I vantaggi della tecnica del Telerilevamento consistono: nell'osservazione in remoto, che permette l'analisi anche di territori difficilmente raggiungibili; nella capacità di ripresa, in breve intervalli di tempo, di grandi porzioni di territorio; la possibilità di monitorare la stessa zona a intervalli temporali noti; la possibilità di analizzare le aree senza perturbarne il territorio corrispondente; nella possibilità, attraverso l'uso di immagini stereoscopiche, di generare DTM(modelli digitali del terreno).

I diversi sistemi usati nel telerilevamento registrano la radiazione elettromagnetica riflessa o emessa dagli oggetti inquadrati che arriva al sensore; si ricorda che la radiazione incidente su di una superficie è caratterizzata da tre diversi modalità di propagazione: trasmissione, assorbimento ed emissione, riflessione.

Il quantitativo di energia elettromagnetica incidente sul sensore dipende dal tempo di integrazione del sensore, dall'area di superficie inquadrata relativa al singolo pixel, dall'angolo solido entro il quale l'osservazione è raccolta e dall'intervallo di lunghezze d'onda relative alle singole bande del sensore.

Le grandezze radiometriche sulle quali si basa tale tecnica, che saranno citate nel seguito dell'elaborato, sono:

- **Flusso Radiante:** è la quantità di energia radiativa trasferita da un punto a un altro, in tutte le direzioni, nell'unità di tempo;
- **Radianza:** è il valore di flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido secondo una certa direzione, viene misurata su un piano perpendicolare a tale direzione;
- **Radianza Spettrale:** è la Radianza rapportata alla particolare lunghezza d'onda, che nel software di elaborazione immagini adoperato (ENVI) è definita Radiance;
- **Riflettività:** è il rapporto tra l'energia riflessa da una superficie e l'energia incidente sulla stessa;
- **Riflettanza:** è il fattore di riflessione, consiste nella riflettività riferita a una particolare banda di lunghezze d'onda.

Lo spettro elettromagnetico è l'insieme continuo e ordinato di tutte le lunghezze d'onda con cui la radiazione elettromagnetica si propaga nello spazio.

La porzione dello spettro elettromagnetico utile nel campo del telerilevamento terrestre è limitata alle bande del visibile, dell'infrarosso e delle microonde; in particolare, gli intervalli spettrali sfruttabili risultano:

Visibile (VIS) 0,38-0,75 μm ; Infrarosso Vicino (NIR) 0,75 - 3,0 μm ; Infrarosso Medio (MIR) 3,0 - 6,0 μm ; Infrarosso Lontano o Termico (TIR) 6,0 - 20,0 μm .

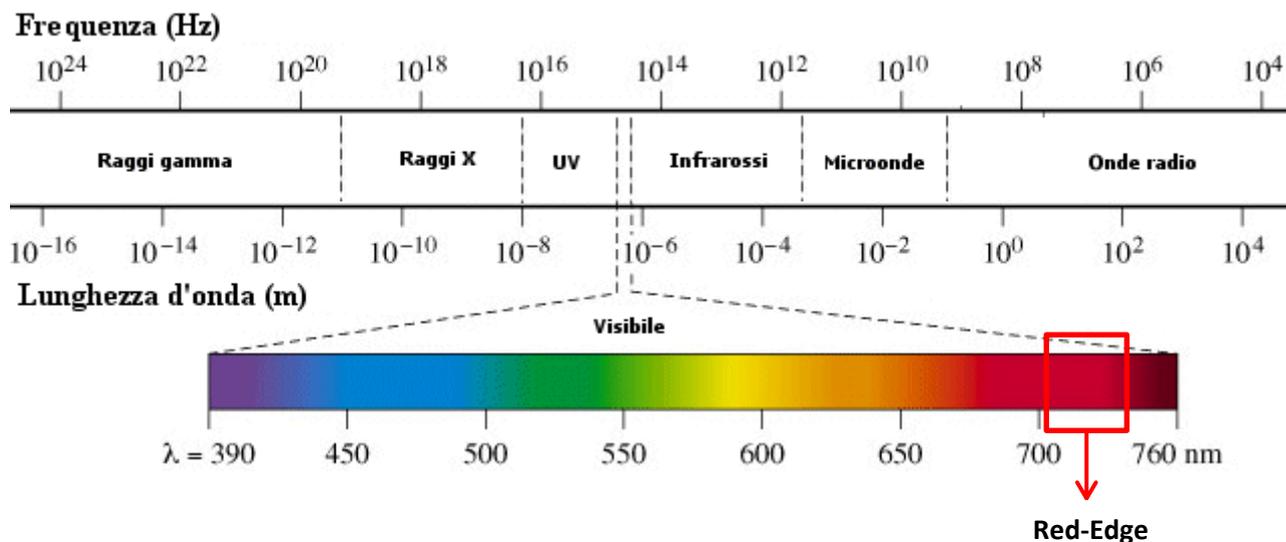


Fig. 1.1 Spettro elettromagnetico con evidenziata la regione del Red-Edge

1.1.1 Le risoluzioni del dato telerilevato da satellite

Nel Telerilevamento da satellite vengono identificate quattro tipologie di risoluzione. Si sottolinea come non è possibile averle tutte alte, ma è necessario arrivare a compromessi soddisfacenti in quanto risultano essere correlate tra di loro.

➤ **Risoluzione Spaziale:** il dettaglio di un'immagine dipende dalla risoluzione spaziale del sensore che è definita come l'area minima sul terreno vista dallo strumento da una data altezza ad un dato istante.

Tale risoluzione dipende innanzitutto dall'IFOV, campo di vista istantaneo, inteso come il cono angolare di visibilità del sensore; la dimensione dell'area osservata è determinata moltiplicando l'IFOV per la distanza tra il terreno e il sensore. Questa area sul terreno corrisponde alla cella di risoluzione e fornisce la risoluzione spaziale massima del sensore; la dimensione della cella di risoluzione al suolo dipende dall'altezza di ripresa e dalle caratteristiche del sensore stesso.

In un'immagine telerilevata la risoluzione è rappresentata dalla dimensione minima dell'elemento di superficie chiaramente riconoscibile o, ancora, dalla distanza minima entro la quale due oggetti appaiono distinti nell'immagine. Affinché un oggetto omogeneo sia osservabile la sua dimensione deve essere generalmente uguale o maggiore della cella di risoluzione (pixel).

Immagini nelle quali sono visibili solo elementi di grandi dimensioni sono dette a bassa risoluzione, mentre quelle in cui sono riconoscibili anche piccoli oggetti sono dette ad alta risoluzione.

I satelliti commerciali forniscono immagini con risoluzioni variabili da 60 centimetri a parecchi chilometri a seconda della modalità di acquisizione, pancromatica o multispettrale, e delle lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico coperte dalla banda; infatti secondo la Teoria Ondulatoria, le onde corte trasportano più energia delle onde lunghe.

A parità di lunghezza d'onda, minore è l'intervallo in cui un sensore acquisisce una determinata banda, ovvero all'aumentare del numero di bande in cui si suddivide un determinato intervallo dello

spettro elettromagnetico, maggiore deve essere la dimensione della cella al suolo affinché l'energia radiante sia sufficiente per

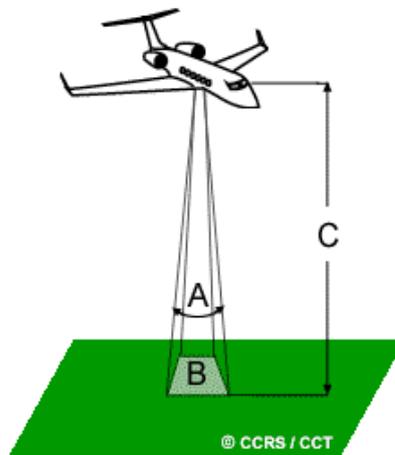


Fig.1.2 Risoluzione Spaziale o Geometrica (Canada Centre for Remote Sensing)

essere rilevata dal sensore.

- **Risoluzione Spettrale:** la risoluzione spettrale si riferisce all'ampiezza delle bande spettrali distinte dal sensore, cioè il minimo intervallo, tra le lunghezze d'onda di due bande spettrali, che un sensore può separare. Migliore è la risoluzione spettrale più stretto risulta l'intervallo di lunghezze d'onda associato a una particolare banda e risulta maggiore il numero di bande rilevate dal sensore.

I sensori pancromatici registrano le lunghezze d'onda che si estendono su tutta la porzione del visibile dello spettro elettromagnetico; di conseguenza la loro risoluzione spettrale è piuttosto bassa, dal momento che diverse lunghezze d'onda dello spettro del visibile non sono distinte singolarmente, ma la riflettanza registrata è globale nell'intera porzione del visibile. I sensori multispettrali sono sensibili all'energia riflessa dalla porzione del visibile dello spettro, ma hanno una risoluzione spettrale più alta per cui sono sensibili all'energia riflessa dagli intervalli di lunghezze d'onda in cui viene suddivisa tale regione, ovvero blu, verde, rosso come illustrato nella figura seguente.

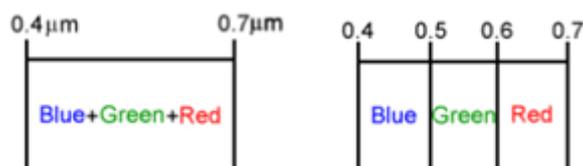


Fig.1.3 Risoluzione Spettrale nel Pancromatico(sx) e nel Multispettrale(dx)
(Canada Centre for Remote Sensing)

Sensori multispettrali avanzati, chiamati iperspettrali, registrano centinaia di sottili bande spettrali nella porzione dello spettro elettromagnetico del visibile, dell'infrarosso vicino e dell'infrarosso medio.

- **Risoluzione Temporale:** la risoluzione temporale viene definita come il tempo che intercorre tra acquisizioni successive della stessa area.

Il periodo di rivisitazione di un sensore satellitare è normalmente di diversi giorni e la risoluzione temporale assoluta di un sistema di telerilevamento, prima di acquisire per la seconda volta la

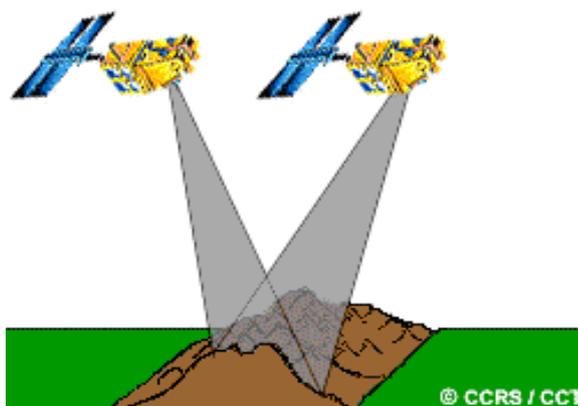


Fig.1.4 Risoluzione Temporale(Canada Centre for Remote Sensing)

stessa area con lo stesso angolo di vista, è uguale a questo periodo.

Alcuni satelliti hanno la capacità di orientare i loro sensori per riprendere la stessa area da posizioni differenti sulla stessa orbita o da orbite adiacenti, realizzando coppie di immagini stereoscopiche, con intervalli temporali più ristretti; in questo modo la risoluzione temporale aumenta, variando però l'angolo di vista della zona.

➤ **Risoluzione Radiometrica:** le caratteristiche radiometriche descrivono il contenuto informativo dell'immagine. La risoluzione radiometrica rappresenta la minima differenza di intensità rilevabile da un sensore tra due valori di energia radiante. Migliore risulta la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile quest'ultimo è nel registrare piccole differenze nell'energia radiante riflessa o emessa. La risoluzione radiometrica viene anche definita come il numero di livelli discreti in cui è possibile suddividere un segnale. Il massimo numero di livelli di luminosità disponibili dipende dal numero di bit usati per memorizzare e rappresentare l'energia registrata.

I dati in una immagine sono generalmente visualizzati in un intervallo di toni di grigio, con il nero che rappresenta il numero digitale 0 e il bianco che rappresenta il valore massimo, definito dal numero di bit. Maggiore è il numero di livelli di grigio in cui è possibile visualizzare l'immagine migliore risulta la risoluzione radiometrica, come riassunto nella tabella seguente.

N.BIT	LIVELLI DI GRIGIO	INTERVALLO DN
2	$2^2 = 4$	0÷3
8	$2^8 = 256$	0÷255
16	$2^{16} = 65536$	0÷65535

Tab.1.1 Risoluzione Radiometrica: Livelli di grigio e intervallo di DN corrispondenti

Si riporta a titolo di esempio due immagini della stessa zona ottenute con differente risoluzione radiometrica reperito in letteratura (Canadian Centre for Remote Sensing).



Fig.1.5 Risoluzione Radiometrica a 2 BIT(sx) e 8 BIT(dx) (Canada Centre for Remote Sensing)

1.2 Comportamento spettrale della vegetazione

La foglia della pianta è l'organo principale del processo di fotosintesi, gli elementi responsabili di tale processo, in cui si trovano i pigmenti di clorofilla, sono i cloroplasti.

I cloroplasti si trovano o lungo le pareti del parenchima clorofilliano (clorenchima), riempite con linfa e protoplasma, delle cellule che costituiscono il mesofillo, o nel mezzo della sezione della foglia.

La struttura cellulare delle foglie è fortemente variabile a seconda della specie ed è influenzata dalle condizioni ambientali avute durante la crescita; l'organizzazione spaziale delle cellule nel parenchima clorofilliano spesso risponde all'esigenza di ottimizzare la cattura della luce, inoltre nella anatomia della foglia spesso si hanno una grande quantità di spazi intercellulari, contenenti aria satura di umidità.

Nelle foglie di tipo bifacciale, il parenchima clorofilliano è suddiviso in un parenchima superiore a palizzata, contenente cellule allungate disposte in modo ordinato, e in un parenchima lacunoso inferiore, formato da cellule di forma varia con presenza di spazi intercellulari molto evidenti. Le cellule a palizzata tendono a formarsi nella porzione del mesofillo verso il lato da cui la luce entra nella foglia.

Una caratteristica della struttura cellulare della foglia è di essere di dimensioni molto maggiori rispetto alle lunghezze d'onda della luce: le dimensioni tipiche delle celle sono $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ per le cellule a palizzata e $18\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ per le cellule nel mesofillo spugnoso.

All'interno di tali cellule, come detto precedentemente, si trovano i cloroplasti; tali elementi sono sospesi all'interno del protoplasma cellulare e sono generalmente dei dischi piatti, con un diametro di 5-8 μm e spessore di circa 1 μm , che presentano all'interno dei filamenti lunghi e esili chiamati "grana" all'interno dei quale si trova la clorofilla.

Solitamente possono essere presenti in ciascuna cella di parenchima circa 50 cloroplasti.

La grana può avere dimensioni di 0.5 μm di lunghezza e 0.05 μm di diametro, molto inferiori a quelle delle cellule di parenchima e prossimi alle lunghezze d'onda della luce; a causa di queste dimensioni può essere responsabile di una notevole dispersione della luce entrante nel cloroplasto.

I materiali presenti nella foglia importanti dal punto di vista della luce e delle radiazioni sono: la cellulosa delle pareti cellulari, l'acqua e i soluti (ioni, piccole e grandi molecole come proteine e acidi nucleici), gli spazi aerei e i pigmenti all'interno dei cloroplasti. Tra i pigmenti la più importante al fine della fotosintesi è la clorofilla, che si distingue in Chla e Chlb, entrambe essenziali per la conversione da luce solare a ossigeno che avviene nel processo.

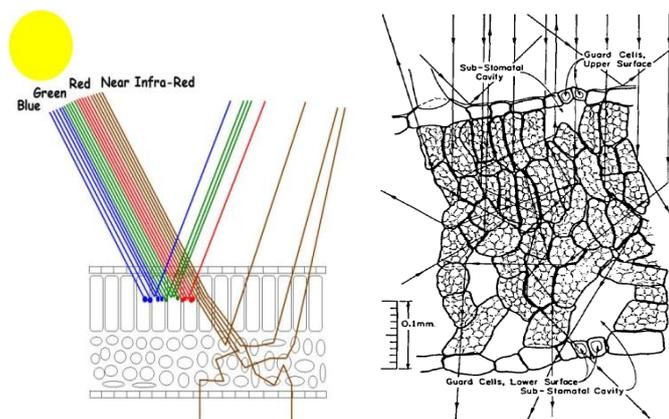


Fig.1.6 Interazione luce solare e struttura fogliare

Il contenuto di clorofilla varia sia all'interno dello stessa specie, sia tra specie diverse, ed è di significativo interesse nella valutazione della salute delle piante; inoltre la quantità di radiazione solare assorbita da una foglia è in gran parte funzione delle concentrazioni fogliari di pigmenti fotosintetici, di conseguenza un basso contenuto di clorofilla è un fattore limitante al potenziale fotosintetico della pianta stessa. La combinazione di queste due caratteristiche è alla base delle procedure di analisi con il telerilevamento (Richardson et al., 2001).

I pigmenti fotosintetici generalmente presenti nei cloroplasti sono: clorofilla (65%), caroteni (6%), e xantofilla (29%); la distribuzione percentuale è altamente variabile in funzione delle condizioni ambientali e del tipo di pianta (Gates et al., 1965). Inoltre la

pigmentazione, ovvero il contenuto percentuale dei differenti pigmenti, è proporzionale allo stato di salute e di stress della pianta, generalmente in condizioni di stress il contenuto di carotenoidi aumenta mentre diminuisce la quantità di clorofilla (Peñuelas et al.,1998).

I differenti pigmenti sono responsabili della riflettanza della foglia in diversi intervalli dello spettro elettromagnetico: nell'intervallo 430-445 nm, COASTAL, la riflettanza è attribuibile ai caroteni; in corrispondenza di 531-570 nm, GREEN, la maggior influenza è data dalla xantofilla; nel range 550-680 nm, RED, e 700-770 nm, RED-EDGE, la principale responsabile è la clorofilla; nelle lunghezze d'onda relative al vicino infrarosso è la struttura fogliare a influenzare il comportamento. Di conseguenza la luce rossa è fortemente assorbita dalla clorofilla, mentre l'energia del vicino infrarosso viene utilizzata come 'lunghezza d'onda di riferimento', in quanto permette di compensare le differenze di struttura fogliare tra le differenti specie (Richardson et al., 2001).

I principi teorici alla base delle precedenti considerazioni sono descritti in dettaglio in (Markwell et al.,1995).

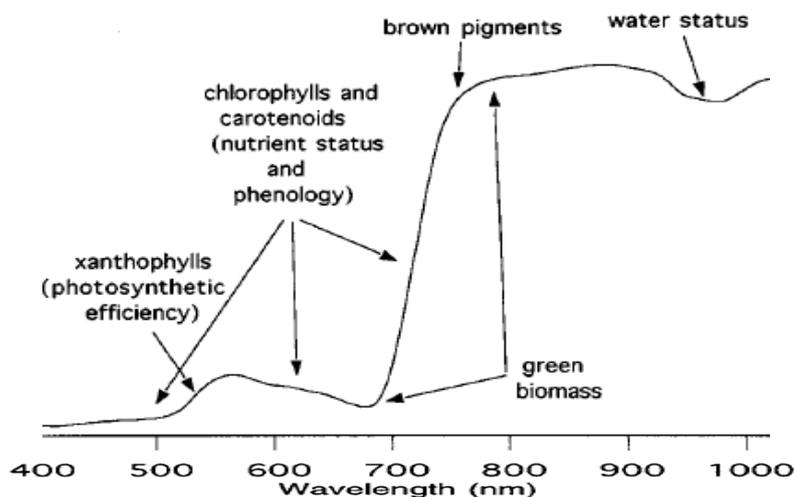


Fig.1.7 Regioni dello spettro in cui i differenti pigmenti hanno maggiore influenza (Peñuelas et al.,1998)

L'analisi della riflettanza è un metodo alternativo per lo studio e la determinazione di diversi fattori relativi alla pianta: lo stato di salute in riferimento al contenuto di clorofilla; il quantitativo dei nutrienti, dei parametri fenologici, dello stato di stress dalla

percentuale di carotenoidi e clorofilla; l'efficienza fotosintetica dalla presenza della xantofilla (Peñuelas et al.,1998).

Le proprietà ottiche della foglia nel VIS sono determinate dalle caratteristiche biochimiche risultanti dalla presenza dei diversi tipi e quantità di pigmenti.

Il forte assorbimento nell'intervallo tra 450 nm e 680 nm è dovuto all'attività clorofilliana, mentre il significativo aumento di riflettanza e trasmittanza nel NIR è causato dallo scattering dovuto all'interfaccia aria-cellula all'interno del mesofillo spugnoso della foglia.

Di conseguenza nel VIS e nella parte del Red-Edge l'effetto della variazione dei livelli di foglia e della copertura fogliare, stimata tramite l'indice LAI, è poco significativo, mentre è di maggior importanza nel NIR (Asner,1998). L'indice di area fogliare LAI (Leaf Area Index) è definito come il rapporto tra la superficie fogliare totale e la superficie del suolo su cui le foglie si proiettano, Fig.1.8.

Un altro elemento che caratterizza l'andamento della firma spettrale della vegetazione nell'infrarosso vicino a onde corte (SWIR), 1.35 - 2.70 μm , è il contenuto d'acqua.

L'elemento acqua presenta un forte assorbimento della radiazione in corrispondenza delle lunghezze d'onda 1,4 μm , 1.9 μm e 2.6 μm ; di conseguenza un maggior contenuto d'acqua all'interno della foglia è caratterizzato dalla presenza di tre picchi di assorbimento nell'infrarosso vicino. Osservando la firma spettrale in corrispondenza di queste lunghezze d'onda di assorbimento si può indagare lo stress idrico della pianta.

La regione del Red-Edge, compresa tra il Rosso e il Vicino Infrarosso, è caratterizzata da un brusco cambiamento della riflettanza nella transizione tra 670 nm e 800 nm causato dalla combinazione dell'effetto di assorbimento della clorofilla nel primo intervallo e dalla forte riflettività della struttura fogliare nel secondo (Main et al.,2011).

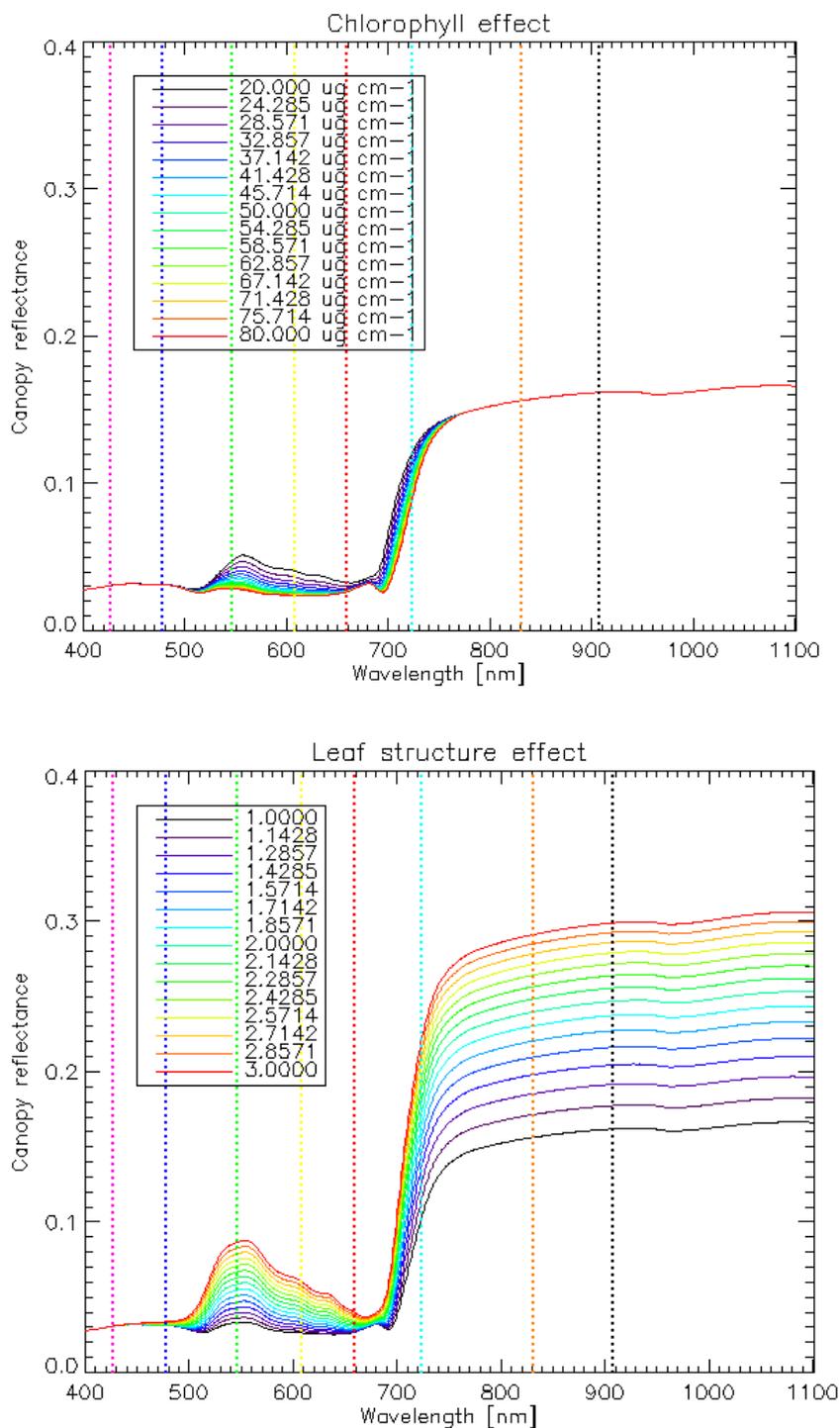


Fig.1.8 Firma spettrale in funzione della variazione del contenuto di clorofilla (in alto) e della copertura fogliare (in basso) (Borel, 2010)

Come detto precedentemente i due picchi di assorbimento locale nel NIR (1000 nm e 1200 nm) sono corrispondenti all'assorbimento dell'acqua, quindi il parametro responsabile è il contenuto d'acqua; inoltre entrambi i picchi sono influenzati anche dalla copertura fogliare, in quanto la pendenza corrispondente aumenta all'aumentare del valore dell'indice LAI (Leaf Area Index), come si può notare dalla Fig.1.9.

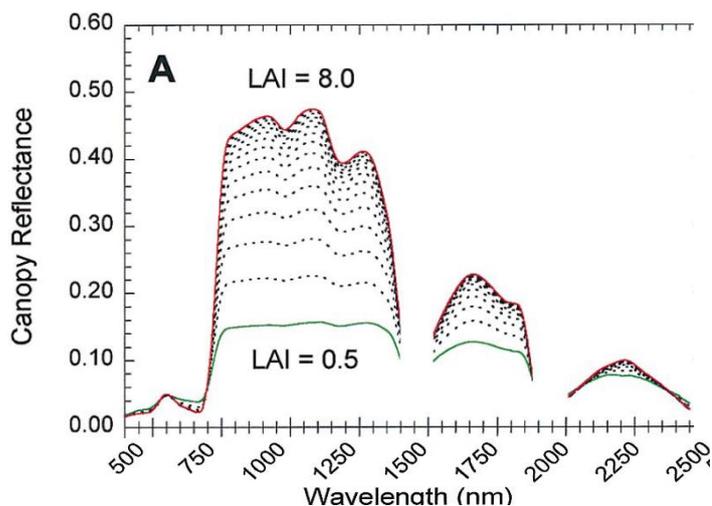


Fig.1.9 Picchi di assorbimento dell'acqua al variare del LAI (Asner,1998)

La decrescita del contenuto di clorofilla è solitamente associata a una situazione di stress per la pianta con ingiallimento delle foglie, questo comporta uno spostamento, shift, della curva nel Red-Edge verso lunghezze d'onda più corte e un innalzamento della firma in tale regione dello spettro elettromagnetico con aumento dei valori di riflettanza (Main et al.,2011).

Più precisamente la risposta allo stress da parte della pianta consiste in una tendenza alla diminuzione del contenuto di clorofilla e della relativa capacità di assorbimento delle radiazioni: questo si nota nello spettro con l'aumentare dei valori di riflettanza nel rosso, intorno a 700nm; inoltre la curva tende a spostarsi verso la parte dello spettro elettromagnetico coperto dal blue: questo fenomeno è conosciuto come BLUE SHIFT della curva di riflettanza nella zona del Red-Edge (Carter et al.,2001).

In conclusione si può notare come la riflettanza maggiore si abbia nel NIR, rimanendo però su valori quasi costanti al variare del contenuto di clorofilla non essendone praticamente influenzata; mentre la parte di spettro elettromagnetico che risente maggiormente delle variazioni causate da una situazione di stress è la zona denominata Red-Edge, tra 680 e 750 nm.

Per foglie completamente gialle, con al loro interno un bassissimo contenuto di clorofilla, la riflettanza nell'intervallo Red-Edge è molto alta e spostata verso lunghezze d'onda più corte; con un miglioramento dello stato di salute e il conseguente aumentare della

concentrazione di clorofilla la riflettanza in questa zona decresce e si sposta verso l'Infrarosso vicino.

Nella figura Fig.1.9 si mostra il comportamento della firma spettrale al variare del contenuto di clorofilla in un esempio di letteratura (Gitelson et al.,1995).

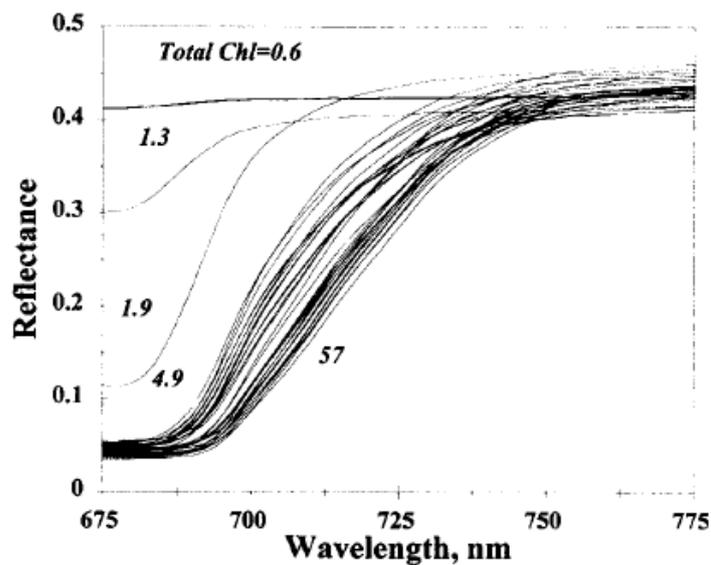


Fig.1.10 Andamento della Firma Spettrale al variare del contenuto di Clorofilla nella zona del Red-Edge (Gitelson,1996)

1.2.1 Indici della vegetazione

Per analisi effettuate attraverso l'utilizzo di dati satellitari in una determinata zona di interesse, si sfruttano delle combinazioni algebriche tra le bande del sensore per ottenere informazioni relative al fenomeno studiato. Tali combinazioni prendono il nome di "indici": si basano sulla misura dei valori di riflettanza relativi alle bande non correlate tra loro e che forniscono una minore ridondanza di informazioni.

Nel caso della vegetazione gli Indici di riflettanza spettrale sono utilizzati per valutare molti aspetti fisiologici (contenuto di clorofilla, copertura fogliare, contenuto d'acqua...); tali parametri possono essere determinati misurando la riflettanza spettrale nel campo del VIS e del NIR.

La riflettanza è relativamente bassa nelle lunghezze del VIS, a causa dell'assorbimento da parte dei pigmenti fotosintetici; mentre gli elevati valori che si verificano nel NIR sono dovuti alla struttura e allo spessore della foglia in quanto la trasmittanza diminuisce all'aumentare di quest'ultimo (Gutierrez-Rodriguez et al., 2005).

Si nota anche che i valori di riflettanza in tutte le bande dello spettro elettromagnetico sono più bassi nelle piante in condizioni di stress rispetto alle piante che non subiscono questa situazione; questa differenza è accentuata per gli intervalli di lunghezza d'onda relativi alle bande del Red-Edge e del NIR (Teale et al., 2011).

A seguito di tali considerazioni, l'Indice più comune e utilizzato nell'analisi della vegetazione per stimarne la presenza e il potenziale fotosintetico è quello denominato NDVI (Gutierrez-Rodriguez et al., 2005).

La combinazione algebrica di tale indice è la seguente:

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

dove R_{BAND} è il valore di riflettanza nella banda BAND.

Da differenti studi si è notato che questo indice garantisce risultati migliori rispetto a altri comunemente proposti in letteratura (Teale et al., 2011).

In alternativa è stato proposto il GNDVI per stimare il quantitativo di biomassa verde (Gitelson et al.,1995) che sfrutta la seguente combinazione:

$$\text{GNDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{GREEN}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{GREEN}})$$

dove R_{BAND} è il valore di riflettanza nella banda BAND.

Da precedenti elaborati si è notato che NDVI e GNDVI sono più alti in piante cresciute in condizioni di minore stress rispetto a quelle cresciute in prossimità di situazioni stressanti (Gutierrez-Rodriguez et al.,2005) e (Avantaggiato, 2011).

Un altro indice è stato stimato e proposto da Datt nel 1999, con studi relativi allo spettroradiometro, per individuare il contenuto di clorofilla, questo indice è ottenibile dalla combinazione:

$$\text{DATT} = (R_{850} - R_{710}) / (R_{850} - R_{680})$$

dove R_x è il valore di riflettanza nella lunghezza d'onda X.

La riflettanza vicino alla lunghezza d'onda 710 nm, Red-Edge, è fortemente influenzata dal contenuto di clorofilla a differenza dell'infrarosso vicino NIR, 850 nm, che subisce un'influenza davvero minima. L' utilizzo dei valori di riflettanza delle due bande sopra citate, R_{710} e R_{850} , nell' indice aumentano la correlazione col contenuto di clorofilla. Di conseguenza il nuovo indice offre migliori prestazioni, rispetto a tutti quelli proposti in letteratura fino ad ora, in merito alla stima del contenuto di clorofilla da satellite. Il nuovo indice proposto da Datt risulta anche essere insensibile all'effetto di scattering della foglia ed è fortemente variato in relazione all'assorbimento del contenuto di clorofilla della foglia stessa.

Nell'intorno di 710 nm la riflettanza risulta essere più sensibile al contenuto di clorofilla rispetto all'intervallo in prossimità di 550 nm, dove subisce l'effetto e l'influenza di altri pigmenti in aggiunta alla clorofilla (Richardson et al., 2001); in conseguenza a tale osservazione nella seguente tesi l'Indice GNDVI non è stato preso in considerazione.

La correlazione tra la riflettanza, alle singole lunghezze d'onda, e la variazione di clorofilla è di tipo lineare; in particolare si sottolinea come nelle lunghezze d'onda del visibile questa correlazione sia negativa.

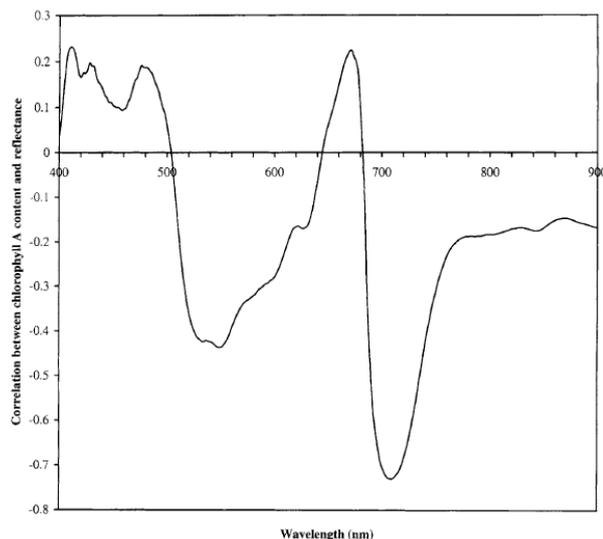


Fig.1.11 Correlazione riflettanza-clorofilla in relazione alle lunghezze d'onda.
 Asse delle ascisse: Lunghezze d'onda; Asse delle ordinate: Coefficiente di correlazione (Datt,1998)

Il nuovo indice DATT appare evidenziare una maggior correlazione con il contenuto di clorofilla rispetto agli indici proposti in precedenza in letteratura; inoltre il nuovo indice funziona bene sia in piante giovani, sia in piante più mature, a differenza di altri indici che si comportano in modo differente a seconda dell'età della pianta.

In letteratura, sempre con l'utilizzo dello Spettroradiometro viene proposto un ulteriore indice specifico per il contenuto clorofilliano denominato ChlNDI. La combinazione algebrica relativa a tale indice è:

$$\text{ChlNDI} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$$

dove R_x è il valore di riflettanza nella lunghezza d'onda X (Richardson et al., 2001).

Con l'introduzione della banda RED-EDGE, ricordando che il suo intervallo di copertura nello spettro elettromagnetico varia tra 705 nm e 745 nm, è stato possibile sostituire la banda del RED nella formulazione sopra citata di NDVI.

Con la presenza della nuova banda del NIR nell'immagine WorldView è stato sperimentato, in alcuni studi su tale dato, un nuovo indice di NDVI denominato NDVI2 nel quale si sostituisce la banda NIR2 alla classica NIR1; si è notato che NDVI2 presenta valori maggiori del NDVI classico in quanto la riflettanza nel NIR2 è più alta del NIR1 (Wolf,2010).

Sostituendo anche in questo caso la banda RED con la banda RED-EDGE, come per l'indice NDVI, si trovano due differenti Indici che meglio sono correlati al contenuto di biomassa e allo stato di salute della pianta (Mutanga,2011); da notare come sostituendo al NDVI classico la banda del RED-EDGE si ottenga un Indice molto simile al ChlNDI proposto per lo spettroradiometro.

In questo caso di studio gli Indici utilizzati per l'analisi della Pineta, a seguito di quanto riportato precedentemente, sono:

- $NDVI = (R_{NIR1} - R_{RED}) / (R_{NIR1} + R_{RED})$ [Copertura;Chl+LAI] identificato come N1R;
- $NDVI = (R_{NIR1} - R_{RED-EDGE}) / (R_{NIR1} + R_{RED-EDGE})$ [Foglia;Chl] identificato come N1RE;
- $NDVI = (R_{NIR2} - R_{RED}) / (R_{NIR2} + R_{RED})$ [Copertura;Chl+LAI] identificato come N2R;
- $NDVI = (R_{NIR2} - R_{RED-EDGE}) / (R_{NIR2} + R_{RED-EDGE})$ [Foglia;Chl] identificato come N2RE;
- $DATT = (R_{NIR1} - R_{RED-EDGE}) / (R_{NIR1} - R_{RED})$ [Foglia;Chl] identificato come DATT.

dove R_{BAND} è il valore di riflettanza nella banda BAND; mentre tra [] si trova il livello di dettaglio a cui sono applicabili e i parametri che li influenzano.

2 I DATI SATELLITARI

2.1 Aster

Il sensore multispettrale ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) si trova a bordo della piattaforma TERRA, equipaggiata con una serie di sensori che assicurano un ampio spettro di indagini scientifiche, progettata dalla NASA nell'ambito dell'EOS (Earth Observing System).

Il lancio del veicolo spaziale è avvenuto il 18 dicembre 1999 e la vita prevista è intorno alla decina di anni; il sensore dal quale proviene la nostra immagine ha già superato la vita attesa da 6 anni.

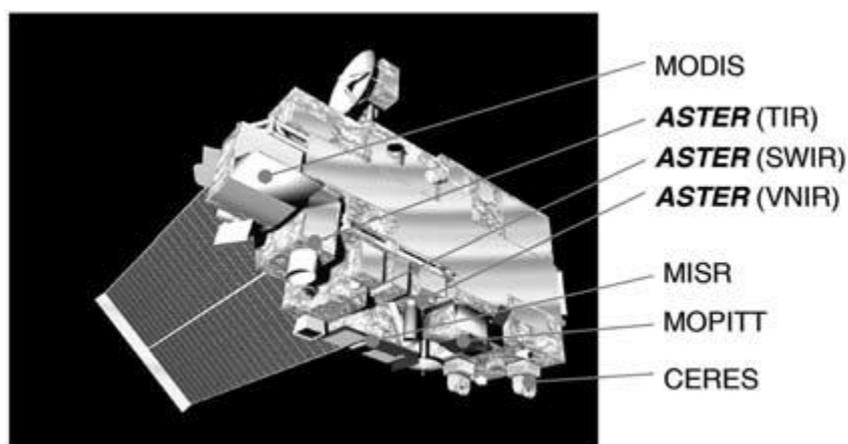


Fig.2.1 Piattaforma TERRA

Nella tabella Tab.2.1 seguente si riportano le caratteristiche relative al sensore.

Orbita percorsa	Quasi polare, eliosincrona
Quota del satellite	700÷737 km
Periodo	98.88 minuti
Frequenza di rivisitazione (nadirale)	16 giorni
Orbite al giorno	14
Area Inquadrata	60 km *60 km
Swath	60 km
Scene acquisite al giorno	650

Tab.2.1 Caratteristiche sensore Aster

Il sensore acquisisce in 14 bande coprendo un'ampia regione dello spettro elettromagnetico, dal visibile all'infrarosso termico, prestandosi a un grande numero di applicazioni; la risoluzione

radiometrica è a 8 bit per pixel (256 livelli). ASTER opera mediante tre sottosistemi: VNIR, SWIR, TIR.

Il sottosistema VNIR (Visible and Near-infrared) utilizza 3 bande, GREEN, RED, NIR, con risoluzione geometrica di 15 m; il sottosistema SWIR (Shortwave Infrared) sfrutta 6 bande nell' infrarosso con risoluzione geometrica di 30 m, non è più in funzione dal 2010; il sottosistema TIR (Thermal Infrared) agisce mediante 5 bande nel termico con risoluzione geometrica di 90 m. Una caratteristica importante del sensore è la mancata acquisizione nella banda BLUE, questo genera l' impossibilità di visualizzare l'immagine a colori naturali.

Di seguito si riporta la tabella Tab.2.2 con le bande e i rispettivi range di influenza.

Sottosistema	Banda	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione spaziale (m)
VNIR	1 (GREEN)	0.52-0.60	15
	2 (RED)	0.63-0.69	15
	3 (NIR)	0.78-0.86	15
SWIR	4	1.60-1.70	30
	5	2.145-2.185	30
	6	2.185-2.225	30
	7	2.235-2.285	30
	8	2.295-2.365	30
	9	2.360-2,430	30
TIR	10	8.125-8.475	90
	11	8.475-8.825	90
	12	8.925-9.275	90
	13	10.25-10.95	90
	14	10.95-11.65	90

Tab.2.2 Sottosistemi, bande (con il relativo range) e risoluzione spaziale di Aster

L'interesse per questo tipo di dato non si basa solamente sulle sue caratteristiche radiometriche e multispettrali, ma anche sulle possibilità di un suo utilizzo di tipo geometrico, legato alla particolarità di fornire in un unico file due immagini stereoscopiche idonee per la creazione di modelli digitali del terreno (DEM). L'acquisizione stereoscopica avviene nella banda 3 del sottosistema VNIR, posta nella regione dell'infrarosso vicino (0,78-0,86 μm), con risoluzione a terra di 15 m. L'acquisizione è ottenuta mediante due telescopi : quello principale (N, Nadir) orientato in

direzione nadirale e l'altro (B, Backward) con un angolo di circa 27.7 gradi rispetto a questa.

Il sistema è di tipo pushbroom: sul nadirale si utilizzano 3 sensori lineari CCD che producono le bande G, R e NIR, mentre sul telescopio Backward vi è il solo array lineare relativo alla banda 3B.

Il dato Aster può presentarsi con due livelli di elaborazione differenti: L1A è il dato grezzo ma presenta già le bande coregistrate tra di loro; L1B è il dato corretto radiometricamente, geometricamente ed è georeferenziato in un sistema globale; entrambi i livelli sono forniti assieme ai metadati contenenti le informazioni relative all'immagine.

I dati satellitari sono sempre accompagnati da un file costituito dai metadati, in formato differente in base al tipo di sensore a cui si riferiscono.

I metadati sono composti da informazioni relative al dato che ne permettono la conoscenza approfondita da parte dell'utente; le informazioni riguardano: chi genera il dato, la denominazione e il livello del dato, le diverse risoluzioni, le modalità e i tempi di acquisizione, le coordinate dell'area ripresa nel sistema di riferimento utilizzato, le condizioni ambientali in cui è stato acquisito.

Si riportano di seguito i metadati relativi ai file Aster utilizzati in questa tesi.

➤ **Aster 26/05/05**

```
GROUP = CLOUDCOVERAGE
  OBJECT = SCENECLOUDCOVERAGE
    NUM_VAL = 1
    VALUE = 0
  END_OBJECT = SCENECLOUDCOVERAGE
  OBJECT = QUADRANTCLOUDCOVERAGE
    NUM_VAL = 4
    VALUE = (0, 0, 0, 0)
  END_OBJECT = QUADRANTCLOUDCOVERAGE
END_GROUP = CLOUDCOVERAGE
OBJECT = FLYINGDIRECTION
  NUM_VAL = 1
  VALUE = "DE"
END_OBJECT = FLYINGDIRECTION
OBJECT = SOLARDIRECTION
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (147.261555, 63.497354)
```

```
END_OBJECT = SOLARDIRECTION
OBJECT = SPATIALRESOLUTION
  NUM_VAL = 3
  VALUE= (15, 30, 90)
END_OBJECT = SPATIALRESOLUTION
GROUP = SCENEFOURCORNERS
  OBJECT = UPPERLEFT
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (44.6697699987057, 11.7120036152057)
END_OBJECT = UPPERLEFT
  OBJECT = UPPERRIGHT
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (44.5424993120986, 12.6357581843096)
END_OBJECT = UPPERRIGHT
  OBJECT = LOWERLEFT
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (44.1126657395182, 11.5673103570559)
END_OBJECT = LOWERLEFT
  OBJECT = LOWERRIGHT
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (43.9863613005681, 12.4825545367843)
END_OBJECT = LOWERRIGHT
END_GROUP = SCENEFOURCORNERS
OBJECT = SCENECENTER
NUM_VAL= 2
VALUE = (44.328859, 12.099462)
END_OBJECT = SCENECENTER
OBJECT = MAPORIENTATIONANGLE
NUM_VAL = 1
VALUE = 12.9014646800371
END_OBJECT = MAPORIENTATIONANGLE
END_GROUP = SCENEINFORMATION
OBJECT= MPMETHOD1
  NUM_VAL= 1
  VALUE= "UTM"
  END_OBJECT= MPMETHOD1
OBJECT= UTMZONECODE1
  NUM_VAL= 1
  VALUE= 33
END_OBJECT= UTMZONECODE1
```

➤ **Aster 18/05/11**

```
GROUP= CLOUDCOVERAGE
    OBJECT = SCENECLOUDCOVERAGE
    NUM_VAL= 1
    VALUE= 2
END_OBJECT = SCENECLOUDCOVERAGE
    OBJECT = QUADRANTCLOUDCOVERAGE
    NUM_VAL= 4
    VALUE= (0, 1, 6, 3)
END_OBJECT= QUADRANTCLOUDCOVERAGE
END_GROUP= CLOUDCOVERAGE
OBJECT= SOLARDIRECTION
VALUE= (152.32962, 62.712549)
END_OBJECT= SOLARDIRECTION
GROUP = SCENEFOURCORNERS
    OBJECT= UPPERLEFT
    NUM_VAL= 2
    VALUE= (45.0128930364277, 11.6669507240246)
END_OBJECT= UPPERLEFT
    OBJECT= UPPERRIGHT
    NUM_VAL= 2
    VALUE= (44.8737592464489, 12.5927051601222)
END_OBJECT= UPPERRIGHT
    OBJECT= LOWERLEFT
    NUM_VAL= 2
    VALUE= (44.4577755027656, 11.5074565063205)
END_OBJECT= LOWERLEFT
    OBJECT= LOWERRIGHT
    NUM_VAL= 2
    VALUE= (44.3197303798883, 12.4246659842875)
END_OBJECT= LOWERRIGHT
END_GROUP = SCENEFOURCORNERS
OBJECT= SCENECENTER
NUM_VAL= 2
VALUE = (44.667085, 12.048017)
END_OBJECT= SCENECENTER
OBJECT= MAPORIENTATIONANGLE
VALUE = 13.9771236504298
END_OBJECT= MAPORIENTATIONANGLE
END_GROUP= SCENEINFORMATION
OBJECT= MPMETHOD1
    NUM_VAL= 1
    VALUE= "UTM"
END_OBJECT= MPMETHOD1
OBJECT= UTMZONECODE1
    NUM_VAL= 1
    VALUE= 33
END_OBJECT= UTMZONECODE1
```

➤ **Aster 27/05/11**

```
GROUP= CLOUDCOVERAGE
  OBJECT = SCENECLOUDCOVERAGE
  NUM_VAL= 1
  VALUE= 0
END_OBJECT= SCENECLOUDCOVERAGE
  OBJECT= QUADRANTCLOUDCOVERAGE
  NUM_VAL= 4
  VALUE= (0, 0, 0, 0)
END_OBJECT= QUADRANTCLOUDCOVERAGE
END_GROUP= CLOUDCOVERAGE
OBJECT= SOLARDIRECTION
NUM_VAL= 2
VALUE= (147.318469, 64.234494)
END_OBJECT= SOLARDIRECTION
GROUP= SCENEFOURCORNERS
  OBJECT= UPPERLEFT
  NUM_VAL= 2
  VALUE= (44.6682760325569, 11.7237462739548)
END_OBJECT= UPPERLEFT
  OBJECT = UPPERRIGHT
  NUM_VAL= 2
  VALUE= (44.5409091337206, 12.6474553027725)
END_OBJECT= UPPERRIGHT
  OBJECT= LOWERLEFT
  NUM_VAL= 2
  VALUE = (44.1111831950312, 11.5789438925855)
END_OBJECT= LOWERLEFT
  OBJECT = LOWERRIGHT
  NUM_VAL= 2
  VALUE = (43.9847842379582, 12.4941445692037)
END_OBJECT= LOWERRIGHT
END_GROUP= SCENEFOURCORNERS
OBJECT = SCENECENTER
NUM_VAL= 2
VALUE = (44.327323, 12.111128)
END_OBJECT= SCENECENTER
OBJECT= MAPORIENTATIONANGLE
NUM_VAL = 1
VALUE= 12.901464674832
END_OBJECT= MAPORIENTATIONANGLE
END_GROUP= SCENEINFORMATION
OBJECT= MPMETHOD1
  VALUE= "UTM"
  END_OBJECT= MPMETHOD1
OBJECT= UTMZONECODE1
  VALUE= 33
END_OBJECT= UTMZONECODE1
```

➤ **Aster 28/06/11**

```
GROUP= CLOUDCOVERAGE
  OBJECT= SCENECLOUDCOVERAGE
  NUM_VAL= 1
  VALUE= 0
END_OBJECT= SCENECLOUDCOVERAGE
  OBJECT= QUADRANTCLOUDCOVERAGE
  NUM_VAL= 4
  VALUE= (0, 0, 0, 0)
END_OBJECT= QUADRANTCLOUDCOVERAGE
END_GROUP= CLOUDCOVERAGE
  OBJECT= SOLARDIRECTION
  NUM_VAL= 2
  VALUE= (142.061721, 65.242199)
END_OBJECT= SOLARDIRECTION
GROUP= SCENEFOURCORNERS
  OBJECT= UPPERLEFT
  NUM_VAL= 2
  VALUE = (44.6654530913869, 11.7455620422162)
END_OBJECT = UPPERLEFT
  OBJECT =UPPERRIGHT
  NUM_VAL= 2
  VALUE= (44.5379074584706, 12.6691856185688)
END_OBJECT = UPPERRIGHT
  OBJECT= LOWERLEFT
  NUM_VAL = 2
  VALUE = (44.1083815321901, 11.6005570649913)
END_OBJECT= LOWERLEFT
  OBJECT = LOWERRIGHT
  NUM_VAL= 2
  VALUE= (43.9818069855325, 12.515676097667)
END_OBJECT = LOWERRIGHT
END_GROUP= SCENEFOURCORNERS
OBJECT = SCENECENTER
NUM_VAL= 2
VALUE = (44.324422, 12.132801)
END_OBJECT= SCENECENTER
OBJECT = MAPORIENTATIONANGLE
VALUE = 12.901464674832
END_OBJECT= MAPORIENTATIONANGLE
END_GROUP = SCENEINFORMATION
OBJECT= MPMETHOD1
  VALUE= "UTM"
  END_OBJECT= MPMETHOD1
OBJECT= UTMZONECODE1
  VALUE= 33
END_OBJECT= UTMZONECODE1
```

2.2 WorldView-2

WorldView-2 è il secondo satellite di nuova generazione di DigitalGlobe, costruito da Ball Aerospace sfruttando le tecnologie più avanzate.

Il satellite è stato lanciato il giorno 8 Ottobre del 2009 da Vandenberg AFB in California a bordo del veicolo Delta 7920; le immagini vengono commercializzate dalla stessa compagnia DigitalGlobe.



Fig.2.2 WorldView-2

Il tempo di vita atteso per il satellite è di 7,25 anni considerando tutte le possibili fonti di consumo e degrado.

Nella tabella Tab.2.3 si riportano le caratteristiche del sensore.

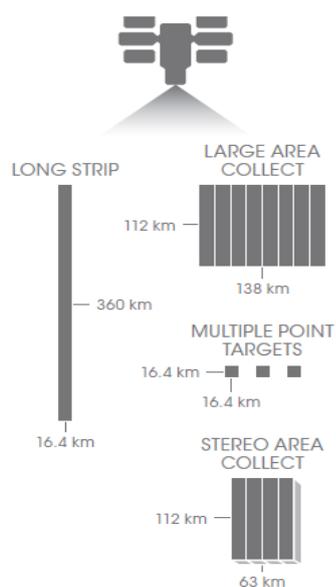
Orbita percorsa	Quasi polare, eliosincrona
Quota del satellite	770 km
Periodo	100 minuti
Frequenza di rivisitazione (nadirale)	1.1 giorni
Swath	16.4 km
Area inquadrata	16.4 km * 14 km

Tab.2.3 Caratteristiche del sensore WorldView-2

WorldView-2 è l'unico satellite commerciale, insieme a WorldView-1, ad essere dotato di un sistema di controllo dell'orientazione che gli conferisce grande agilità migliorandone le capacità di manovra e di acquisizione di target predefiniti. Un'altra caratteristica è legata alla peculiarità di ruotare rapidamente per acquisire con estrema precisione punti localizzati in posizioni differenti grazie a un sistema di giroscopi (CMGs), sensori stellari e GPS. Le tecnologie di cui è dotato gli consentono di acquisire vaste aree in tempi rapidissimi, circa 1 milione di km² al giorno: infatti lo slew time risulta di 9 secondi per 200 km. Grazie al suo sistema di scanning bidirezionale, WorldView-2 è inoltre in grado di acquisire anche in modalità stereoscopica, con un tempo medio di rivisitazione di 1.1 giorni.

Collection Scenarios

(30° off-nadir angle)



Altitude and Slew Time

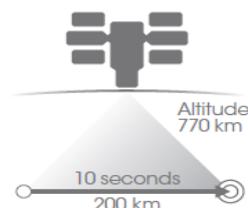


Fig.2.3 Caratteristiche del sensore WorldView-2

WorldView-2 è il primo satellite commerciale multispettrale ad alta risoluzione spettrale con risoluzione spaziale nel pancromatico di 46 cm al nadirale e 52 cm sotto il nadirale, mentre nel multispettrale rispettivamente 1.85 m e 2.07 m; tale risoluzione viene commercializzata, all'interno dei metadati (file .IMD), come 0.5 metri nel pancromatico e 2 metri nel multispettrale.

La risoluzione radiometrica risulta pari a 11 bits per pixel (2048 livelli).

Nella seguente tesi il nome WorldView-2 viene sostituito dalla sigla WV-2.

In particolare il satellite ad alta risoluzione WV-2 è in grado di acquisire, accanto alle quattro tipiche bande Blu, Green, Red ed Near Infrared 1, quattro ulteriori bande multispettrali, "inedite" su un satellite ad altissima risoluzione: Coastal band, Yellow band, Red-edge, Near Infrared 2 Band(Tab.2.4).

Banda	Lunghezza d'onda (μm)	Risoluzione spaziale (m)
PANCRONATICO	0.450-0.800	0.5
1 (COASTAL)	0.400-0.450	2
2 (BLUE)	0.450-0.510	2
3 (GREEN)	0.510-0.580	2
4 (YELLOW)	0.585-0.625	2
5 (RED)	0.630-0.690	2
6 (RED-EDGE)	0.705-0.745	2
7 (NIR1)	0.770-0.895	2
8 (NIR2)	0.860-1.040	2

Tab.2.4 Bande(con il relativo range) e risoluzione spaziale di WV-2

L'elevata risoluzione spaziale consente la discriminazione dei dettagli, come i veicoli, barriere coralline poco profonde e anche i singoli alberi in un frutteto; l'alta risoluzione spettrale fornisce informazioni dettagliate sulle aree inquadrare come la qualità delle superfici stradali, la profondità del mare, la salute delle piante(Digitalglobe,2010).

Di conseguenza le applicazioni in cui viene sfruttato il sensore, grazie alle sue potenzialità dovute alla alta risoluzione geometrica e spettrale, sono:

- Analisi batimetriche;
- Classificazione di coperture del suolo a livello di dettaglio;
- Analisi dello stato della vegetazione.

I dati satellitari sono sempre accompagnati da un file costituito dai metadati, in formato differente in base al tipo di sensore a cui si riferiscono.

I metadati sono composti da informazioni relative al dato che ne permettono la conoscenza approfondita da parte dell'utente; le informazioni riguardano: chi genera il dato, la denominazione e il

livello del dato, le diverse risoluzioni, le modalità e i tempi di acquisizione, le coordinate dell'area ripresa nel sistema di riferimento utilizzato, le condizioni ambientali in cui è stato acquisito.

Si riportano di seguito i metadati relativi al file WV-2 utilizzato in questa tesi presenti nel file IMD.

```
bandId = "Multi";
panSharpenAlgorithm = "None";
numRows = 26287;
numColumns = 10956;
productLevel = "LV2A";
productType = "Standard";
numberOfLooks = 1;
radiometricLevel = "Corrected";
radiometricEnhancement = "Off";
bitsPerPixel = 16;
compressionType = "None";
```

```
BEGIN_GROUP =BAND_"nome della banda"
ULLon = 12.18698091;
ULLat = 44.65072266;
ULHAE = 40.00;
URLon = 12.46301275;
URLat = 44.65719254;
URHAE = 40.00;
LRLon = 12.48339126;
LRLat = 44.18435601;
LRHAE = 40.00;
LLLon = 12.20956997;
LLLat = 44.17799134;
LLHAE = 40.00;
outputFormat = "GeoTIFF";
BEGIN_GROUP =IMAGE_1
satId = "WV02"
mode = "FullSwath";
scanDirection = "Forward";

BEGIN_GROUP =MAP_PROJECTED_PRODUCT
firstLineTime = 2011-05-29T10:47:29.234388Z;
meanSunAz = 167.8;
meanSunEl = 67.0;
meanSatAz = 269.5;
meanSatEl = 63.5;
meanOffNadirViewAngle = 23.4;
cloudCover = 0.000;
mapProjName = "UTM";
```

```
mapProjCode = 1;
mapZone = 33;
mapHemi = "N";
productUnits = "M";
originX = 276946.99976624;
originY = 4948000.99999866;
orientationAngle = 0.0;
colSpacing = 2.00;
rowSpacing = 2.00;
ULX = 276946.99976624;
ULY = 4948000.99999866;
ULH = 40.00;
URX = 298856.99988647;
URY = 4948000.99999860;
URH = 40.00;
LRX = 298856.99989308;
LRY = 4895428.99999855;
LRH = 40.00;
LLX = 276946.99977987;
LLY = 4895428.99999855;
LLH = 40.00.
```

Per un ulteriore approfondimento della lettura dei metadati del dato WV-2 si rimanda al manuale *DigitalGlobe Imagery Support Data (ISD) Documentation*.

2.2.1 Le nuove bande di WV-2

Il satellite WV-2 ad alta risoluzione spaziale possiede anche un'elevata risoluzione spettrale sia nel visibile, garantita dalla presenza di 6 bande nel range tra 400 nm e 0.745 nm, sia nell'infrarosso vicino, 2 bande nell'intervallo 770-1040 nm.

Le caratteristiche delle 8 bande e i relativi intervalli di lunghezze d'onda coperti sono i seguenti:

1.COASTAL (400-450 nm): la banda è utile per lo studio di aree costiere e degli ambienti marini grazie alle sue caratteristiche di penetrazione nell'acqua, perciò risulta essere ideale per le analisi batimetriche; viene inoltre utilizzata per migliorare i risultati nei processi di correzione atmosferica essendo sostanzialmente non influenzata dallo scattering atmosferico.

Un altro ruolo importante, ricoperto da questa banda, è quello di supporto alle analisi sulla vegetazione in quanto ricopre un range dello spettro elettromagnetico caratterizzato dall'assorbimento da parte della clorofilla presente nelle piante in salute.

2.BLUE (450-510 nm): la banda viene utilizzata nei processi di correzione atmosferica essendo poco influenzata dallo scattering atmosferico; viene sfruttata per distinguere la vegetazione dal terreno, per avere una mappatura delle foreste e per la classificazione delle colture.

3.GREEN (510-580 nm): la banda consente di individuare lo stato di salute delle piante evidenziando un picco di riflettanza per le piante sane dovuto alla forte presenza di clorofilla, di conseguenza è utile per individuare il vigore della pianta.

4.YELLOW (585-625 nm): la banda contribuisce alla migliore resa a colori naturali delle immagini; viene sfruttata per ottimizzare i processi di classificazione. Grazie al range ricoperto supporta le analisi sullo stato di salute della vegetazione consentendo di individuare l'ingiallimento nella vegetazione stessa.

5.RED (630-690 nm): la banda è focalizzata sulle lunghezze d'onda assorbite dalla clorofilla nelle piante in salute. Questa

caratteristica permette di sfruttarla nell' analisi della vegetazione sia per la classificazione, sia per valutarne lo stato di salute. Inoltre risulta utile per individuare strade, terreno nudo e caratteristiche geologiche sulla zona osservata.

6. RED-EDGE (705-745 nm) : la banda è fondamentale per l'analisi approfondita delle condizioni di salute della vegetazione ricoprendo l'intervallo di lunghezze d'onda maggiormente influenzato dal contenuto di clorofilla.

Fornisce supporto all' operazione di classificazione della vegetazione in quanto permette di distinguere sia piante giovani da piante mature, sia conifere da caducifoglie; inoltre si presta ad analisi nel settore dell' Oil and Gas e dell'agricoltura di precisione.

7. NIR1 (770-895 nm) : la banda è utile per analizzare il quantitativo di umidità e biomassa vegetale, oltre per classificare la vegetazione e i tipi di suoli. Svolge un ruolo importante nell' individuazione dei confini tra corpi d'acqua e vegetazione; ricade nel range dell' NIR classico.

8. NIR2 (860-1040 nm) : la banda, nuova nel campo dell' infrarosso vicino, è di supporto all' analisi della vegetazione e delle biomasse aumentandone le possibilità e capacità discriminatorie.

L'intervallo ricoperto si sovrappone in parte a quello del NIR1, ma è meno influenzato dall'atmosfera.

Nel complesso la presenza delle 4 bande aggiuntive garantisce un miglioramento nell'accuratezza delle classificazioni del 20-30%, rispetto a studi che utilizzano le 4 bande tradizionali (Digitalglobe,2010).

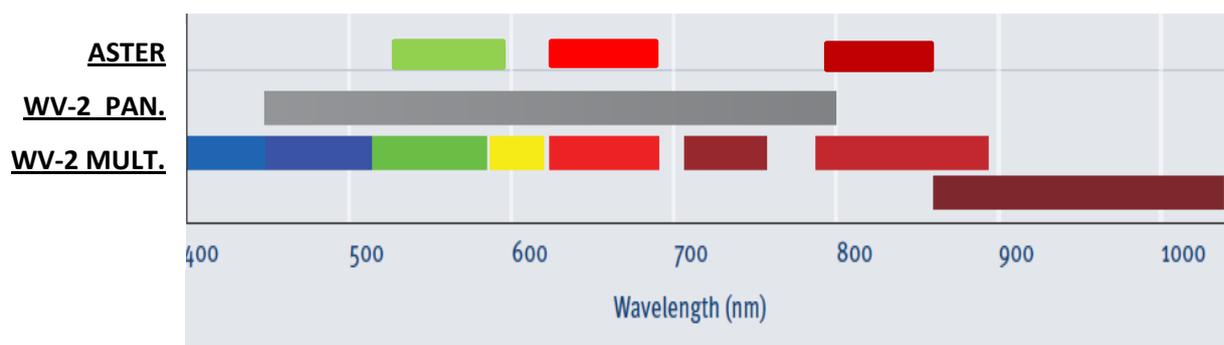


Fig.2.4 Confronto grafico tra i range delle bande del sensore Aster e WV-2 nel VNIR

La presenza delle 4 bande COASTAL, YELLOW, RED-EDGE, NIR2 permette innovative combinazioni in modalità di visualizzazione RGB che consentono nuove possibilità di contrasto visivo degli oggetti presenti sulla scena. Le combinazioni seguenti sono da intendersi come banda 1-canale R, banda 2-canale G, banda 3-canale B:

- a. RED, GREEN, BLUE (5,3,2): è la classica combinazione a colori naturali, vengono utilizzate le bande del visibile nei rispettivi canali. Gli oggetti sul terreno appaiono con colori simili a quelli con cui l'occhio umano gli percepisce.



Fig.2.5 Combinazione RED, GREEN, BLUE (RGB)

- b. NIR1, RED, GREEN (7,5,3): è la standard combinazione a falsi colori; la vegetazione appare rossa, le aree urbane in azzurro, il terreno in diversi gradi di marrone, il ghiaccio, la neve e le nuvole appaiono bianchi o azzurro chiaro.



Fig.2.6 Combinazione NIR1, RED, GREEN

c. NIR1, GREEN, BLUE (7,3,2): è una combinazione a falsi colori modificata; consente di distinguere le conifere, le caducifoglie e l'erba con una variazione di tonalità più ampia rispetto alla combinazione standard.

Le conifere appaiono con tonalità di rosso scuro, le caducifoglie in tonalità di rosso più luminose, mentre le aree erbose con tonalità tra il rosso e l'arancione.



Fig.2.7 Combinazione NIR1, GREEN, BLUE

d. NIR1, RED-EDGE, RED (7,6,5): è la combinazione di bande per la vegetazione, perché copre le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico in cui, a causa della clorofilla, l'energia passa da essere assorbita all'essere riflessa. Le conifere sono in tonalità tra il marrone e il verde, le zone erbose e coltivate tendono invece a tonalità tra il giallo e l'arancione, mentre il suolo nudo e la roccia appaiono in grigio; questa combinazione permette un'ottima individuazione della copertura della vegetazione.



Fig.2.8 Combinazione NIR1, RED-EDGE, RED

e. NIR2, YELLOW, COASTAL (8,4,1): è una combinazione che consente di distinguere differenti tipi di copertura e uso del suolo in un'ampia varietà di tonalità rendendoli maggiormente riconoscibili. La vegetazione appare rossa e le aree costruite blue, però si evidenzia un'alta varietà di tonalità a seconda dei cambiamenti della vegetazione e delle strutture.



Fig.2.9 Combinazione NIR2, YELLOW, COASTAL

f. NIR2, NIR1, RED-EDGE (8,7,6): questa combinazione si focalizza sulla parte di spettro elettromagnetiche del vicino infrarosso, per questo permette di distinguere la vegetazione, l'acqua e le costruzioni con un alto livello di contrasto. La vegetazione è mostrata in tonalità luminose del giallo.



Fig.2.10 Combinazione NIR2, NIR1, RED-EDGE

g. GREEN,BLUE,COASTAL (3,2,1): è la combinazione che fornisce il più alto livello di penetrazione nell'acqua e le maggiori informazioni legate ad analisi batimetriche. La vegetazione appare con tonalità del rosso, mentre il variare della profondità dell'acqua è illustrato con tonalità che vanno dal grigio, al verde e infine al blu passando da zone basse a zone profonde.



Fig.2.11 Combinazione RGB(sx) e GREEN, BLUE, COASTAL(dx)

Gli esempi sopra riportati sono di letteratura e non relativi al caso di studio. In questo lavoro ci si avvale del supporto, oltre alle classiche modalità di visualizzazione a, b, della combinazione c(NIR1, GREEN, BLUE) E dell'innovativa combinazione d(NIR1, RED-EDGE, RED) per l'individuazione delle piante di Pino all'interno della Pineta; tali combinazioni applicate al caso di studio sono riportate in Fig.2.11.

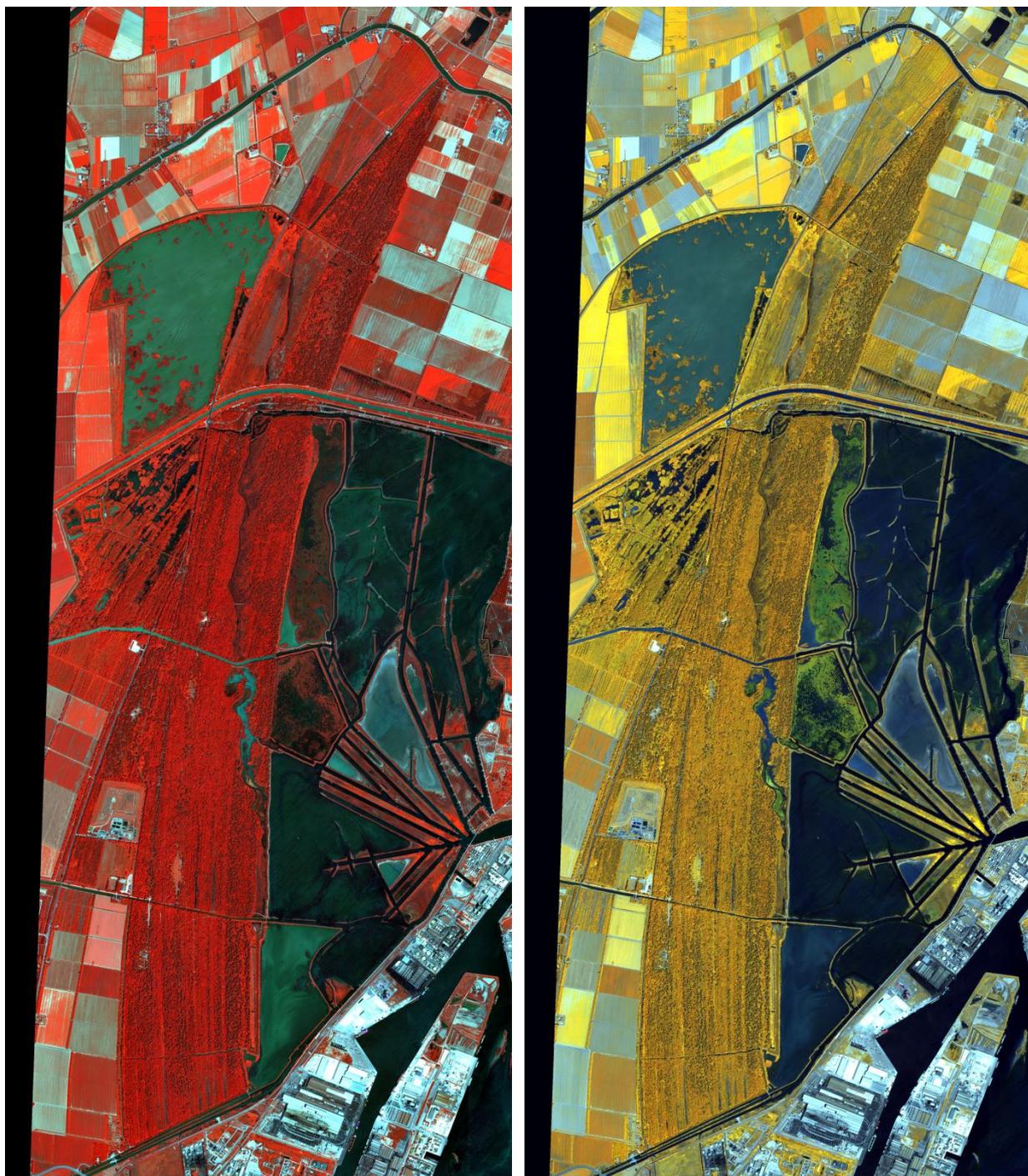


Fig.2.12 Combinazioni NIR1, GREEN, BLUE (sx) e NIR1, RED-EDGE, RED (dx) sulla Pineta

3 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

3.1 La pineta di San Vitale

Lo studio degli effetti sulla vegetazione dell'intrusione di acqua salata nell'acquifero viene svolto nell'area boschiva denominata pineta di San Vitale situata a nord della città di Ravenna.

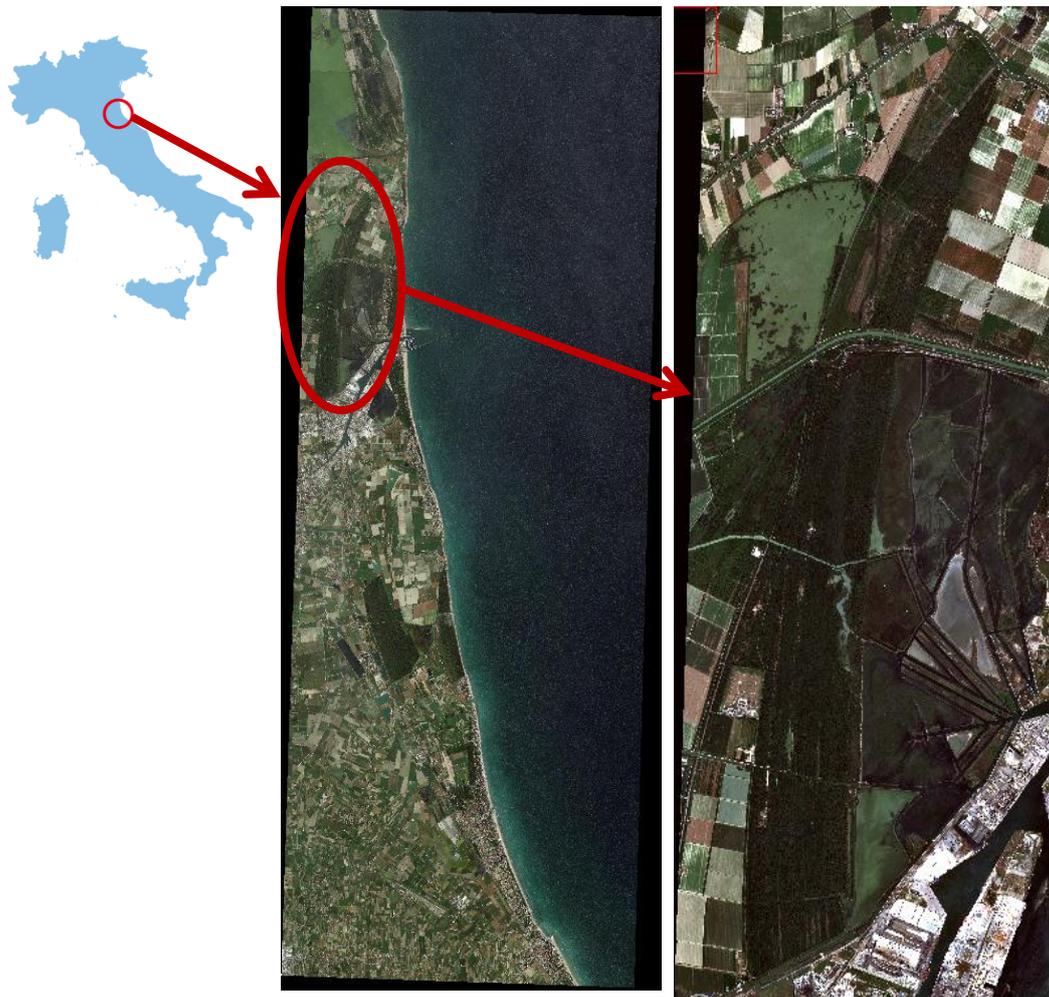


Fig.3.1 Inquadramento area di studio

Per la descrizione della zona studiata e delle sue caratteristiche geologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, idrografiche e di vegetazione, si riporta un riassunto estratto dalla Tesi di Laurea di Avantaggiato (2011) nel quale questo aspetto è trattato in modo esaustivo.

L'area rientra nel Parco del Delta del Po, istituito nel 1988 con apposita legge regionale (L.R. 27/1988). Dal 1996 il Parco è gestito dal Consorzio del Parco Regionale del Delta del Po.

La pineta di San Vitale si colloca ai margini della Pianura Padana romagnola, a circa 10 km a nord della città di Ravenna e la sua estensione è di circa 1133 ettari che si sviluppano, in direzione nord-sud, per circa 11 km lungo la fascia costiera. La Pineta di San Vitale oltre ad essere inserita come Zona "Pre-Parco" nel Parco del Delta del Po, ad eccezione di alcune aree limitrofe alla SS 309 (Zona C), è anche area SIC (Siti di Importanza Comunitaria) - ZPS (Zone di Protezione Speciale) ai sensi della DIR 79/409 CEE e della DIR 92/43/CEE. Quest'area nel corso di secoli è stata soggetta a diversi cambiamenti.

Tra il 1400 e 1500 le pinete erano considerate un bene prezioso e al fine di garantirne una buona gestione fu affidata alle comunità monastiche: nel 1600 le pinete crebbero in ampiezza e lunghezza a seguito di importanti piantumazioni di pino.

Alla fine del 1700 le pinete furono espropriate alle comunità monastiche e cedute a privati che disboscavano ampie zone per dedicarle all'agricoltura.

Nel 1836 le pinete furono affidate a comunità di monaci lateranensi, i quali negli anni successivi concessero l'utilizzo delle pinete da parte di privati, in quegli anni si ebbero le maggiori distruzioni con una riduzione dell'estensione superficiale dei boschi a poco più di 2000 ettari, circa un quarto della superficie originaria, divisi nei due nuclei di Classe, a sud della città di Ravenna, e di San Vitale.

Inoltre le trasformazioni subite dalle aree boschive ravennati, sono strettamente legate alle forti azioni di bonifica e regimazione idraulica susseguitesesi nel corso dei secoli (Zangheri, 1936).

Negli anni 60' il fiume Lamone fu completamente inalveato e condotto a mare attraverso un taglio nella pineta di San Vitale.

Un altro elemento caratteristico della zona in esame è la Piallassa Baiona, con cui la pineta confina a est.

La Piallassa è una laguna interna di origine relativamente recente, solcata al suo interno da una serie di canali disposti a ventaglio che separano chiari di acqua salmastra o dolce. La Piallassa è a diretto

contatto con il mare ed è soggetta a periodico ricambio e variazioni di livello secondo i cicli delle maree (RER, 2003).

L'avvicinamento dell'ambiente marino all'entroterra è testimoniato dalla presenza, nei primi 25 m dal piano campagna, di argille e limi torbosi ai quali si sovrappongono sedimenti marini costieri e di prodelta, parte interamente subacquea del delta.

Le oscillazioni del mare e i forti fenomeni di subsidenza cui è soggetta la zona hanno portato, nel corso dei millenni, al progressivo avanzamento e arretramento della linea di costa dando vita ai cordoni litorali sabbiosi. Proprio su queste paleodune si insedia l'area oggetto di studio. Infatti nella morfologia della pineta è ancora possibile osservare l'alternanza tra "staggi", dossi sabbiosi, e "basse o bassure", depressioni interdunari dove l'acqua ristagna più o meno permanentemente.

Dal punto di vista stratigrafico la zona presenta:

- da 0.5-1 m di profondità uno strato di alterazione;
- da 1 a 10-15 m la prevalenza di sedimenti sabbiosi-limosi;
- da 15 a circa 22 m si hanno limi argillosi e sabbiosi, con un aumento della frazione sabbiosa tra 21 m e 26 m di profondità;
- da 25 ai 30 m si hanno argille limose e limi argillosi caratteristiche dei depositi alluvionali precedenti alla trasgressione, che costituiscono il basamento dell'acquifero freatico.

L'acquifero freatico è principalmente collocato all'interno delle sabbie litorali e localmente nel cuneo di depositi marini poco profondi. A est l'acquifero costiero è non confinato, mentre a circa 3-4 km a ovest dalla costa, risulta essere confinato dai più recenti depositi alluvionali. Lo spessore dell'acquifero varia da un minimo di 0-3 m a un massimo di 30 m in prossimità della linea di costa e diminuisce spostandosi verso ovest; vi è, inoltre, una tendenza all'approfondimento in direzione nord (Giambastiani, 2006).

Per questi motivi nel Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna, la zona di interesse è collocata nell'acquifero A, caratterizzato dalla presenza di depositi di pianura costiera (con spessore massimo 25-30 m) a carattere prevalente sabbioso che garantiscono una buona permeabilità primaria ridotta localmente dalla presenza di limi.

Nella zona in esame, la ricarica dell'acquifero freatico avviene tramite precipitazioni meteoriche, corsi d'acqua e canali anche se l'infiltrazione totale non è sufficiente ad equilibrare la falda freatica dal punto di vista idrodinamico poiché la ricarica superficiale, sebbene già cospicua, viene ulteriormente diminuita dal sistema di drenaggio meccanico e dalla forte urbanizzazione e cementazione a cui è soggetta la zona.

La Pineta di San Vitale è caratterizzata da basse quote topografiche, tra i 2 e i -0.5 m s.l.m., mentre il livello freatico varia tra i -2.0 m e 1.5 m s.l.m. nel periodo invernale e tra i -2.0 m e 0.5 m s.l.m. nel periodo estivo. Le variazioni stagionali di livello non sono molto pronunciate poiché l'intera area è costantemente soggetta all'azione delle idrovore per il drenaggio dei campi circostanti. Solo nella parte centrale della pineta si verificano delle variazioni stagionali determinate dalla ricarica diretta del fiume Lamone e dei canali circostanti che in primavera raggiungono i massimi livelli idrometrici. Le zone più critiche, per l'intrusione di acqua salata risultano essere quelle nella parte meridionale e settentrionale della Pineta, dove la falda risulta essere sotto il livello del mare per l'intero anno (Giambastiani, 2006).

Il sistema idrografico presente nella pineta San Vitale, Fig.3.2, è complesso. Comprende diversi corpi d'acqua naturali e artificiali, bacini di acqua dolce come le Valli Mandriole, di acqua salmastra come la Piallassa Baiona e numerose opere di regimazione idrica.

A nord di San Vitale, troviamo il Canale del Rivalone che porta le sue acque nel Canale destra Reno, il quale sfocia nell'Adriatico presso Casal Borsetti. L'acqua dolce che alimenta questa zona costiera, deriva sia dal fiume Reno, sia dal fiume Lamone, sia dalla rete scolante del comprensorio di bonifica.

Inoltre è presente il Canal Fossatone, che alimenta l'impianto di potabilizzazione della città di Ravenna, da cui si diramano a sud il Canale Taglio della Baiona e a nord la Canaletta Enichem che taglia longitudinalmente la Pineta e serve l'omonima industria poco distante (Giambastiani, 2006).



Fig. 3.2 Sistema idrografico della pineta di San Vitale (Avantaggiato,2011)

3.1.1 La vegetazione nella pineta

Nella pineta di San Vitale si riscontrano le caratteristiche tipiche di una zona di transizione tra terra e mare anche osservando la Carta della vegetazione (Fig.3.3). Infatti sono presenti all'interno dell'area diversi habitat: boschi termofili, vegetazione d'acqua dolce, vegetazione d'acqua salmastra, vegetazione delle sabbie.

La vegetazione xerofila, tipica dei climi aridi e situata sui cordoni dunosi, è identificata dalla presenza di *Quercus robur* (farnia), *Q. pubescens* (roverella) e *Pinus pinea* (pino domestico); ma si individuano anche piante di latifoglie di tipo mesofilo e termofilo, caratteristiche di climi umidi e caldi.

Nelle bassure, caratterizzate da umidità ambientale medio elevata e dove il substrato può essere soggetto a sommersione a causa della risalita della falda, la vegetazione è di tipo meso-igrofila, acquatica di acqua dolce e di acque più o meno salmastre con la presenza di un bosco igrofilo a *Populus alba* (pioppo bianco), *Fraxinus oxycarpa* (frassino) e *Ulmus minor* (olmo campestre).

Mescolate alla vegetazione arborea, le specie arbustive sono ampiamente presenti a formare comunità arbustive vere e proprie, in situazioni pre-forestali o come sintomo di una situazione di degradazione del bosco (Palladin, 2010). Tra le specie arbustive si hanno: *Prunus spinosa*, *Solanum dulcamara*, *Frangula alnus* e *Pyrus piraster*. Ai margini delle zone umide si possono trovare specie come *Juncus acutus* e canneti di *Phragmites australis*.

Il pino domestico (*Pinus pinea*), ovunque di impianto artificiale e quindi non facente parte della vegetazione autoctona, permane principalmente nel bosco xerofilo e mesoigrofilo; si trova prevalentemente nelle facies meno umide in quanto è adatto a suoli asciutti e ben drenati che presentino una falda freatica relativamente profonda dove l'apparato radicale possa svilupparsi in un suolo aerato e stabile; più ampia e diffusa, invece, è la presenza di pino marittimo (*Pinus pinaster*) caratterizzato da una migliore adattabilità.

Di conseguenza si può suddividere la pineta, come mostrato dalla carta della vegetazione, in 3 famiglie di vegetazione (Corticelli,1999; Pirola,1974; Piccoli,1991):

- **Thermophilic Evergreen Forest (TEF):** *Quercus pubescens*, *Quercus robur*, *Fraxinus ornus*, *Pinus pinea*;
- **Thermophilic Deciduous Forest (TDF):** *Quercus pubescens*, *Quercus robur*, *Fraxinus ornus*, *Populus alba*, *Ulmus minor*, *Quercus robur*, *Fraxinus oxycarpa*, *Salix cinerea*, *Pinus pinea*;
- **Lagoonal and riverine Forest:** *Populus alba*, *Salix Cinerea*.

Il pino (*Pinus pinea*) non è appartenente a queste classi, ma è inserito nell'elenco in quanto presente all'interno della pineta e di queste zone di vegetazione autoctona; infatti il pino è ritenuta specie alloctona (non è in grado di riprodursi in questo tipo di ambiente), non è rappresentato nella carta della vegetazione (Fig.3.3).

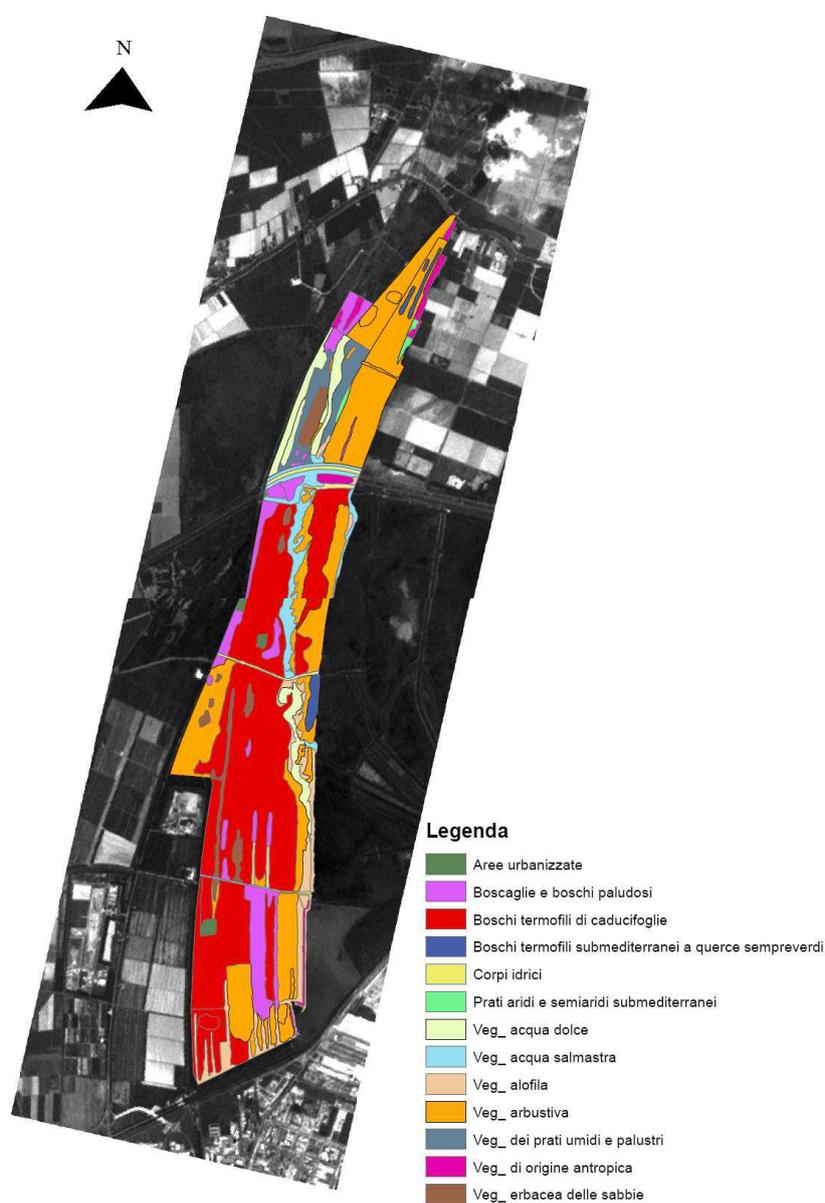


Fig.3.3 Carta della vegetazione della pineta di San Vitale (Avantaggiato,2011)

3.2 L'intrusione di acqua salata e i suoi effetti sulla vegetazione

Il fenomeno dell'intrusione di acqua salata all'interno dell'acquifero sottostante la pineta è uno dei maggiori fattori di stress che caratterizza l'area boschiva oggetto di studio. Le cause di questo fenomeno sono sia di tipo antropico, sfruttamento intensivo della falda acquifera e aumento della domanda idrica; sia naturale, infatti gran parte dell'area è situata sotto il livello del mare e il fenomeno della subsidenza è fortemente presente in questa zona.

Diversi studi precedenti (Gianbastiani, 2006), (Antonellini, 2008), (Greggio, 2013) hanno analizzato il problema.

Si riporta la parte della Tesi di Dottorato di Greggio (2013) relativa al fenomeno citato e di nostro interesse; inoltre nello stesso studio è descritta la metodologia di campionamento con la quale sono stati ottenuti i dati relativi alla salinità con i quali vengono svolte le analisi statistiche in questa tesi.

L'intrusione dell'acqua salata è un fenomeno che avviene spontaneamente negli acquiferi costieri; a causa della presenza d'acqua salata, all'interno dell'acquifero si crea una zona di contatto tra l'acqua dolce, più leggera, che scorre verso mare e l'acqua salata, più pesante, che si incunea dal mare verso l'entroterra. I due sono fluidi parzialmente miscibili e pertanto la zona di contatto assume la forma di una zona di transizione o di diffusione, nella quale la densità dell'acqua passa da quella dell'acqua dolce a quella dell'acqua salata. In alcune condizioni, l'ampiezza della zona di transizione risulta piccola rispetto allo spessore dell'acquifero e può essere approssimata con un fronte netto di interfaccia. Negli acquiferi costieri, come il caso studiato, non confinati si instaura una condizione di equilibrio caratterizzata da un flusso sia nella zona di acqua dolce che nella zona di acqua salata (Cooper, 1959). La forma e la posizione dell'interfaccia è funzione del gradiente idraulico e quindi della profondità del livello freatico; un qualsiasi cambiamento della superficie freatica determina un cambiamento della forma e posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Minime fluttuazioni della posizione di tale superficie di separazione sono determinate da escursioni mareali e da variazioni stagionali della superficie freatica: ne deriva quindi che

l'interfaccia acqua dolce-acqua salata è in uno stato di quasi-equilibrio, ma una diminuzione del livello freatico ne provoca lo spostamento verso terra generando l'intrusione salina.

Alcune attività umane, agendo sul volume di acqua sotterranea o sul carico idraulico possono rompere questo equilibrio e determinare lo spostamento dell'interfaccia verso terra, Fig.3.4.

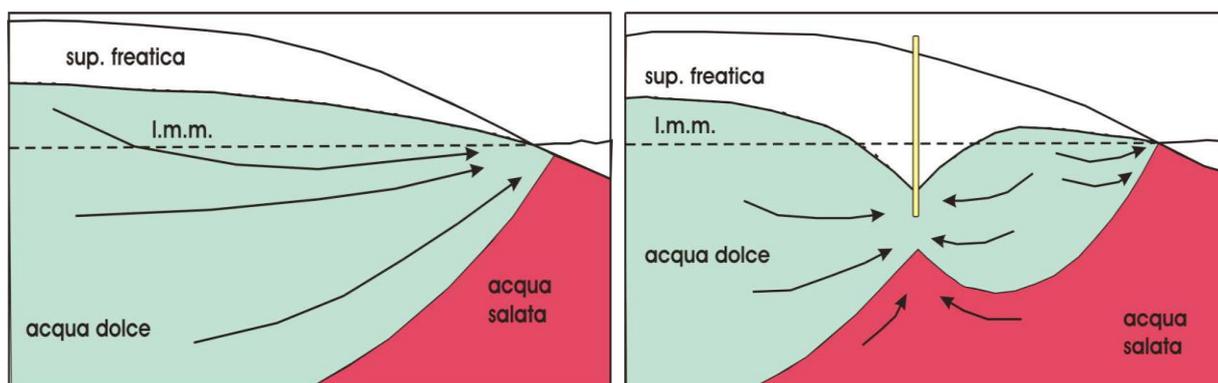


Fig.3.4 Variazione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata in un acquifero freatico costiero (Greggio,2013)

Il principio di Ghyben-Herzberg (Fetter, 2001; Bear et al., 1999) descrive la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata per un acquifero costiero.

Secondo tale principio, negli acquiferi freatici costieri l'interfaccia acqua dolce-acqua salata si trova ad una profondità, rispetto al livello del mare, pari a circa 40 volte l'altezza del livello

piezometrico. Quindi, un abbassamento di 1 cm del livello piezometrico causa la risalita di circa 40 cm di un cono d'acqua salata. Il principio di Ghyben-Herzberg è così formulato:

$$Z_{(x,y)} = \frac{\rho_W}{\rho_S - \rho_W} \times h_{(x,y)}$$

dove:

$Z_{(x,y)}$ = profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata [L];

$h_{(x,y)}$ = la quota della falda sopra il livello del mare [L];

ρ_W = densità dell'acqua dolce [ML⁻³];

ρ_S = densità dell'acqua salata [ML⁻³].

Per $\rho_S = 1025$ [ML⁻³] e $\rho_W = 1000$ [ML⁻³]: $G = \frac{\rho_W}{\rho_S - \rho_W} = 40$.

L'applicazione del principio di Ghyben-Herzberg è limitata a condizioni di equilibrio statico con distribuzione idrostatica della pressione per l'acqua dolce e l'acqua salata stazionaria.

La conduttività idraulica dipende dalla litologia dell'acquifero, quindi le variazioni litostratigrafiche possono avere una forte influenza sulla distribuzione della salinità nell'acquifero freatico (Antonellini et al, 2008).

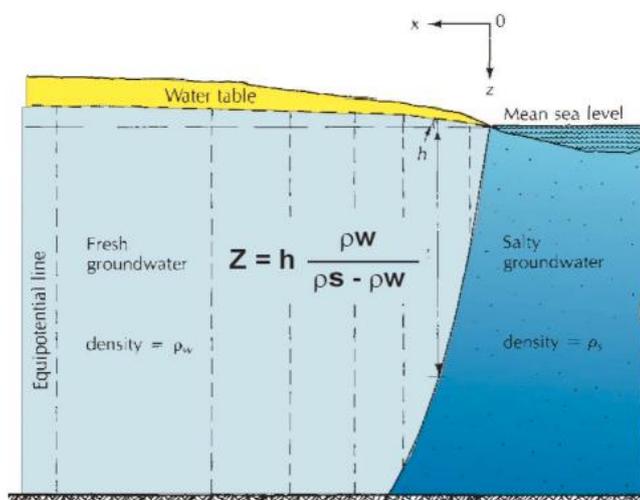


Fig.3.5 Relazione di Ghyben-Herzberg per un acquifero freatico costiero (Greggio,2013)

3.2.1 Monitoraggio della salinità

Per conoscere l'andamento della salinità all'interno della pineta si sono utilizzati i dati registrati nella campagna, eseguita a scala complessiva di acquifero, del dicembre 2010 sfruttando l'utilizzo di piezometri in 63 pozzi, sia interni, sia esterni la pineta stessa, (Greggio, 2013).

Per ciascun pozzo sono stati individuati al proprio interno diversi punti di campionamento, basandosi principalmente sulla descrizione litologica eseguita durante lo scavo e sulla profondità complessiva del pozzo; i dati di interesse per la seguente tesi sono quelli relativi ai punti di campionamento più superficiali al Top della falda.

Per meglio definire le origini delle acque presenti nell'acquifero, oggetto del monitoraggio, sono state campionate anche le acque superficiali che potenzialmente interagiscono con le acque sotterranee, aggiungendo altri 20 siti di campionamento.

Le misure effettuate sono state di:

- Profondità della falda;
- profili di conduttività elettrica e temperatura;
- parametri chimico-fisici;
- analisi chimiche;
- analisi isotopiche.

Si riportano in Fig.3.6 i siti di campionamento relativi ai dati utilizzati per conoscere l'andamento della salinità all'interno della pineta.



Fig.3.6 Immagine Aster a falsi colori (NIR1,RED,GREEN) con sovrapposti i siti di campionamento per l'andamento della salinità in verde.

3.2.2 Effetti della salinità sulla vegetazione

Per descrivere gli effetti della intrusione di acqua salata sulla vegetazione si riporta un riassunto estratto dalla Tesi di Laurea di Avantageggiato (2011) in cui l'analisi di questo aspetto all'interno della pineta è stata fatta in modo esaustivo.

La distribuzione della vegetazione nelle zone costiere dipende principalmente dai tipi di stress a cui le piante sono soggette, tra cui siccità, variazioni del livello di falda e di salinità.

Nell'area boschiva di San Vitale la salinizzazione del suolo e della falda freatica è una delle principali cause che ha portato ad una progressiva degradazione delle pinete con diminuzione e cambiamento delle specie vegetali.

La salinità del suolo e dell'acqua altera i principali processi vegetali come crescita, fotosintesi, sintesi delle proteine e metabolismo. Gli effetti morfologici che si riscontrano nella vegetazione non-alofila, come risposta allo stress salino, sono cambiamenti nella colorazione delle foglie, ispessimento dello spessore fogliare e diminuzione della lunghezza degli steli; inoltre, sempre sulle foglie, si possono manifestare bruciature marginali e necrosi.

Gli effetti negativi dell'eccesso di ioni nella soluzione circolante sul sistema suolo-pianta si articolano essenzialmente in tre fenomeni:

- Un incremento del potenziale osmotico dell'acqua del terreno (effetto osmotico), con riduzione dell'acqua disponibile per l'assorbimento da parte delle piante. L'effetto osmotico riduce lo sviluppo fogliare e l'estensione dell'apparato radicale, diminuendo il processo di fotosintesi.
- Un aumento nei tessuti della concentrazione di alcuni ioni (effetto fitotossico), in particolare del Na, che hanno un effetto tossico e denaturante nei confronti degli enzimi del citoplasma, inibendo la sintesi proteica al livello degli acidi nucleici (Bernstein, 1961; Bernstein, 1975). Questo effetto determina una riduzione di crescita iniziale (riduzione dell'area fogliare, internodi accorciati) e successivamente, nei casi più gravi, imbrunimento, necrosi diffuse e morte dei tessuti (Zuccarini, 2007).

➤ Un'alterazione nel bilancio dell'assorbimento di ioni da parte della pianta, con conseguenti squilibri nella concentrazione di elementi nutritivi all'interno dei tessuti (ion imbalance stress).

Per specie come il *Pinus pinea* e *Pinus pinaster*, studi recenti (Antonellini et al, 2010), hanno individuato che i principali fattori che influenzano la distribuzione sul territorio di queste specie arboree sono due: la salinità e la profondità della falda.

Infatti si è appurato che dove la falda è profonda e si ha una salinità di 5g/l, i pini sono in buona salute e si ha un alta densità arborea, dove invece la falda è prossima al piano campagna, i pini hanno sviluppato il loro apparato radicale orizzontalmente e ciò li rende vulnerabili al vento che tende a sradicarli.

Dove, invece, il livello di falda è inferiore al metro e la salinità bassa (c.a. 3g/l) sono presenti diverse specie vegetali ma i pini non sembrano in salute. Inoltre dall'indagine condotta, si è riscontrato che nelle zone in cui predominano salinità molto elevate, 10-12 g/l, solo alcune specie vegetali appartenenti alle graminacee riescono a sopravvivere (Antonellini et.al, 2010).

Altre specie vegetali che si trovano nella pineta, come *Quercus robur* e *Quercus pubescens* potrebbero essere fortemente influenzate dalla salinità del suolo e dell'acqua, in quanto per la specie *Quercus robur* viene indicato un valore di salinità ottimale da 0 a 3 g/l, Tab.3.1.

Specie Arborea	Range tollerabile di salinità (g/l)	Fonte di letteratura
<i>Pinus pinea</i>	8÷10	(Teobaldelli et al., 2004)
<i>Quercus robur</i> <i>Quercus pubescens</i>	0.5÷3	(Alaoui-Sossé, B et al. 1998); (Sehmer L. et al., 1995)
<i>Populus alba</i>	0÷1	(Kotuby-Amacher et al., 1997)
<i>Ulmus minor</i>	0÷3	(Liu et al., 2012)
<i>Fraxinus oxycarpa</i>	0÷3	(Mass et al., 1984)
<i>Salix cinerea</i>	0÷2.5	(Mirk et al., 2010)

Tab.3.1 Specie vegetali con relativi range di salinità tollerabili (Barbarella et al., 2013)

4 METODOLOGIA

Per l'elaborazione di dati satellitari è necessario svolgere diverse operazioni, elencate nel paragrafo successivo, utilizzando un software di trattamento di immagini digitali. Per la realizzazione di questo lavoro si è scelto di usare il software ENVI 4.8.

A seguito dell'utilizzo di due dati satellitari acquisiti da due sensori differenti e della necessità di un confronto tra di essi, si sono attuate le stesse procedure per entrambi in modo da renderne possibile la comparazione.

ENVI 4.8 è un programma dedicato all'analisi di una vasta gamma di telerilevati, siano essi di tipo pancromatico, multispettrale e iperspettrale, oppure radar. Il software permette di aprire i differenti tipi di dati satellitari, con modalità specifiche relative a ognuno, e di realizzare tutte le operazioni necessarie legate sia alla fase di preprocessing, sia a quella di elaborazione vera e propria.

Per aprire i dati satellitari acquisiti viene utilizzata la funzione **Open External File** consente di sfruttare automaticamente gli header file, informazioni di intestazione interna, presenti nel file stesso; tale funzione viene infatti utilizzata per leggere diversi tipi di file standard tra cui formati DEM, formati militari e formati provenienti da sensori satellitari.

Si riportano visivamente i passaggi di apertura del file Aster e WV-2 utilizzati.

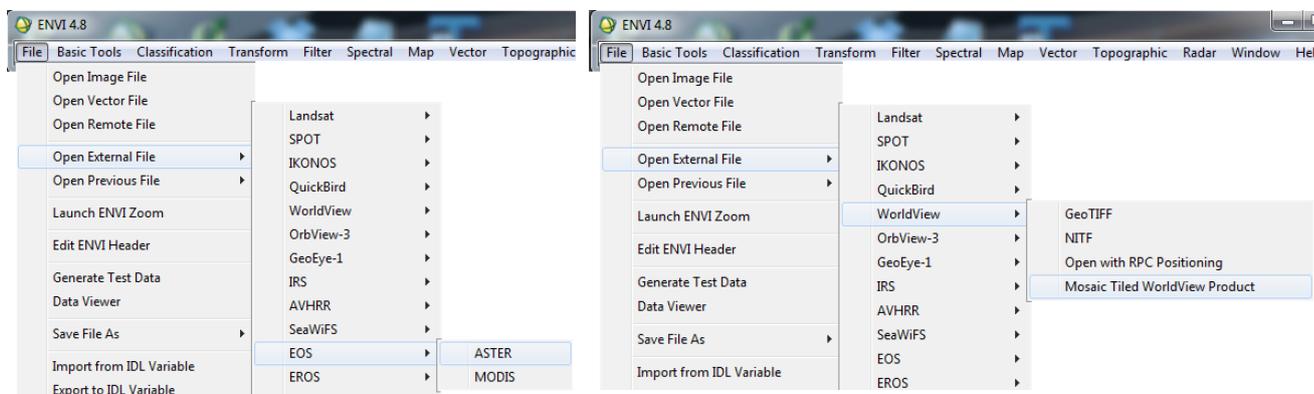


Fig.4.1 Open External File del dato Aster(sx) e WV-2(dx)

La fase di preprocessing, fondamentale per la preparazione di qualsiasi tipologia di dato satellitare acquisito, è funzione della tipologia dei dati a disposizione; nel caso studiato consiste in :

- a) Correzione atmosferica ;
- b) Ritaglio della zona di interesse;
- c) Coregistrazione.

La fase di elaborazione vera e propria è funzione dello scopo del lavoro che ci si presta a realizzare e delle analisi necessarie per perseguire tale obiettivo; in questo caso consiste in:

- a) Realizzare mappe degli indici della vegetazione;
- b) Creare le ROI (Region of Interest) delle aree campione;
- c) Estrarre i valori dei pixel interni alle ROI;
- d) Elaborare statisticamente i dati ottenuti.

4.1 Preprocessing

La fase di preprocessing è fondamentale per poter ottenere dati corretti e confrontabili. Per raggiungere tali obiettivi si è proceduto attraverso le seguenti operazioni:

a) *Correzione atmosferica*

La correzione atmosferica fa parte delle correzioni di tipo radiometrico e ha lo scopo di compensare gli effetti dell'atmosfera nel dato. Si può realizzare tramite due diversi approcci: modelli di trasferimento radiativo o metodi empirici basati sull'immagine. Viene scelto il modello di trasferimento radiativo FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) di ENVI, implementazione dell'algoritmo MODTRAN4 che è il modello attualmente più sofisticato in commercio.

Per potere utilizzare questo modello in ENVI è necessario preparare il dato nel formato di input richiesto.

Il primo passo prevede il passaggio dai DN originali alla corrispondente radianza: mentre per Aster la trasformazione avviene in automatico, per il dato WV-2 deve essere applicata la funzione *WorldView Radiance*; entrambi sono stati, successivamente, memorizzati nel formato standard BIL (band-interleaved-by-line) mediante la funzione *Convert Data (BSQ, BIL, BIP)*. Per il dato WV-2, essendo ancora poco conosciuto e essendoci pochi lavori in letteratura, è stato necessario effettuare prove con differenti combinazioni dei parametri richiesti dal software per i passaggi sopra citati; l'immagine più soddisfacente si è ottenuta imponendo nella finestra *WorldView Calibration Parameters*, che si apre dalla funzione *WorldView Radiance*, come fattore di scala dell'output NO.

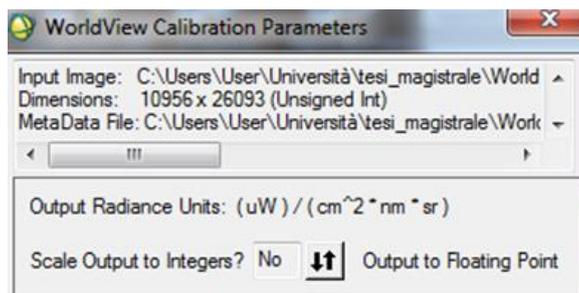


Fig. 4.2 Parametri *WorldView Radiance*

Una volta preparato il dato di input il **FLAASH**, che fa parte dei *Basic Tools- Preprocessing*, richiede l'impostazione di diversi parametri legati al sensore e al suo centro di presa, alle condizioni di illuminazione, alla posizione geografica dell'area interessata. Le informazioni necessarie sono reperite all'interno dei metadati legati all'immagine, mentre le informazioni conseguenti alla posizione geografica sono ottenute dalla tabella Tab 4.1 seguente stilata per il modello MODTRAN; nel caso studiata è applicato il modello relativo a Latitudine 40. In questa tabella i modelli atmosferici indicati sono:

- SAW: Sub-Artic Winter;
- SAS: Sub-Artic Summer;
- MLW: Mid-Latitude Winter;
- MLS: Mid-Latitude Summer;
- T: Tropical.

Latitude (°N)	Jan.	March	May	July	Sept.	Nov.
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLS	MLS	T
-30	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	SAS
-60	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-80	MLW	MLW	MLW	SAW	MLW	MLW

Tab.4.1 Modelli Atmosferici in funzione della Latitudine per l'algoritmo MODTRAN (Atmospheric Correction Module, 2009)

Il modello richiede anche un fattore di scala e si è scelto di impostarlo uguale per tutte le bande: per Aster uguale a 10, mentre per WV-2 uguale a 1. Anche in questo caso per il dato WV-2 sono

servite diverse prove per ottenere il valore corretto in relazione al fattore di scala impostato precedentemente nella *WorldView Radiance*. Si riportano di seguito le finestre di impostazione del modello FLAASH relative a entrambi i dati utilizzati, Fig.4.3 e Fig 4.4.

Fig.4.3 FLAASH per il dato Aster

Fig.4.4 FLAASH per il dato WV-2

Applicando il modello di correzione atmosferica FLAASH si ha la trasformazione da valori di radianza, input, a valori di riflettanza, nell'immagine di output.

Per un maggior approfondimento dello strumento *FLAASH* in ENVI si rimanda al manuale *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide*.

b) Ritaglio della zona di interesse

L'operazione di ritaglio permette di diminuire l' onere computazionale e rendere più rapide tutte le operazioni di elaborazione successive andando a ridurre la pesantezza del dato. Questo viene reso possibile dalla funzione di ENVI *Resize Data*, che consente di tagliare sia con criteri spaziali (*Spatial Subset*) sia in base alle bande che si vuole utilizzare (*Spectral Subset*).

Nello *Spectral Subset* si lasciano selezionate tutte le 8 bande della WV-2 e tutte le 3 bande del VNIR di Aster; nel *Spatial Subset* si impostano le coordinate (E; N) del vertice in alto a sinistra (UL) e del vertice in basso a destra (DR) in modo da creare un rettangolo circoscritto alla zona di interesse, questo viene fatto azionando il bottone *Map* nel *Subset Using* e impostando nella finestra *Spatial Subset by Map* le coordinate volute; successivamente si sceglie *Nearest Neighbor* in *Resize Data Parameters* come tecnica da applicare per l'operazione di Resampling.

Nella tabella sottostante 4.2 si riportano le coordinate dei vertici scelti sia per Aster sia per WV-2 nel sistema di proiezione UTM-33 del Datum WGS-84, la differenza di coordinate è dovuta alla differente risoluzione geometrica del dato e quindi alle dimensioni del lato del pixel, rispettivamente 15 e 2 metri.

DATO	UL (E;N)	DR (E;N)
Aster	(279401.473 ; 4938287.553)	(280628.441 ; 4926311.266)
WV-2	(277766.473 ; 4938362.553)	(282863.441 ; 4926476.266)

Tab.4.2 Coordinate Resize

Si riporta come esempio il risultato dell'operazione sul dato WV-2.

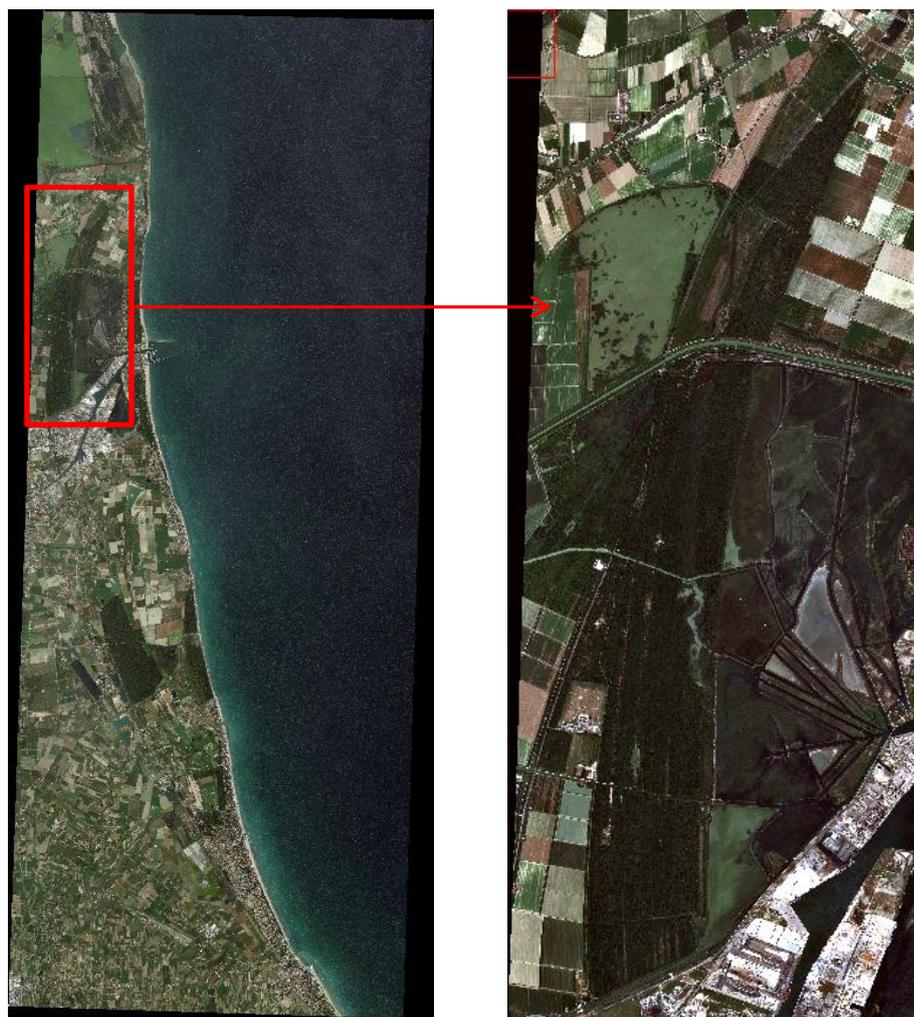


Fig.4.5 Resize Pineta San Vitale

Per un maggior approfondimento sulla funzione *Resize* si rimanda al manuale *ENVI User's Guide*.

c) Coregistrazione

La coregistrazione tra immagini è necessaria nel momento in cui si vogliono rendere confrontabili e sovrapponibili due dati, con la medesima risoluzione geometrica, ottenuti in tempi differenti.

La funzione di ENVI che consente la coregistrazione è *Select GCPs: Image to Image*, sotto il menù *Map-Registration*. La funzione sfrutta l'individuazione a video tramite puntatore da parte dell'utente di GCPs (Ground Control Points), i quali vengono individuati sia nella Base Image (immagine di riferimento), sia nella Warp Image (immagine da coregistrare); molto importante è realizzare un Warp file che abbia lo stesso numero di righe (Output Samples) e colonne (Output Lines) dell'immagine di riferimento Base. La tecnica di Resampling utilizzata anche in questo passaggio è il Nearest Neighbor.

Di seguito la Fig. 4.6 mostra la finestra dei parametri di coregistrazione utilizzati.

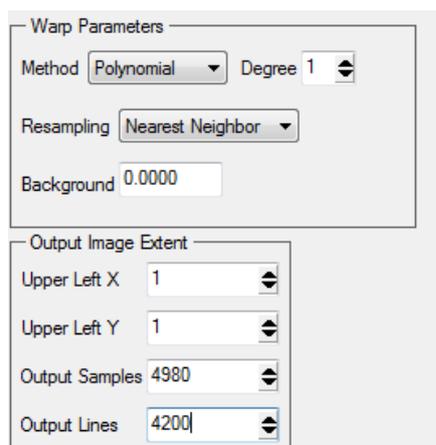


Fig.4.6 Parametri di Coregistrazione per Aster

In tale operazione bisogna considerare anche il parametro Rotation (angolo di rotazione) e verificare che sia lo stesso per entrambe le immagini, in caso contrario va corretta inizialmente l'immagine Warp della differenza, col segno corretto, tramite la funzione *Rotate/Flip Data* dal menù *Basic Tools*.

Nel caso di studio tale operazione si è resa indispensabile tra i dati Aster ed è stata applicata all'intera immagine relativa all'indice NDVI, del modo di realizzare tale immagine si parlerà in seguito.

Per il dato WV-2, invece avendo a disposizione solamente un file e non una successione temporale, non è stata applicata.

Il risultato è una tabella con le coordinate dei GCPs, identificati da un ID numerico, in entrambe le immagini Base e Warp; di seguito si riporta nella Fig.4.7 uno zoom di alcuni GCPs nell'immagine Base e Warp.

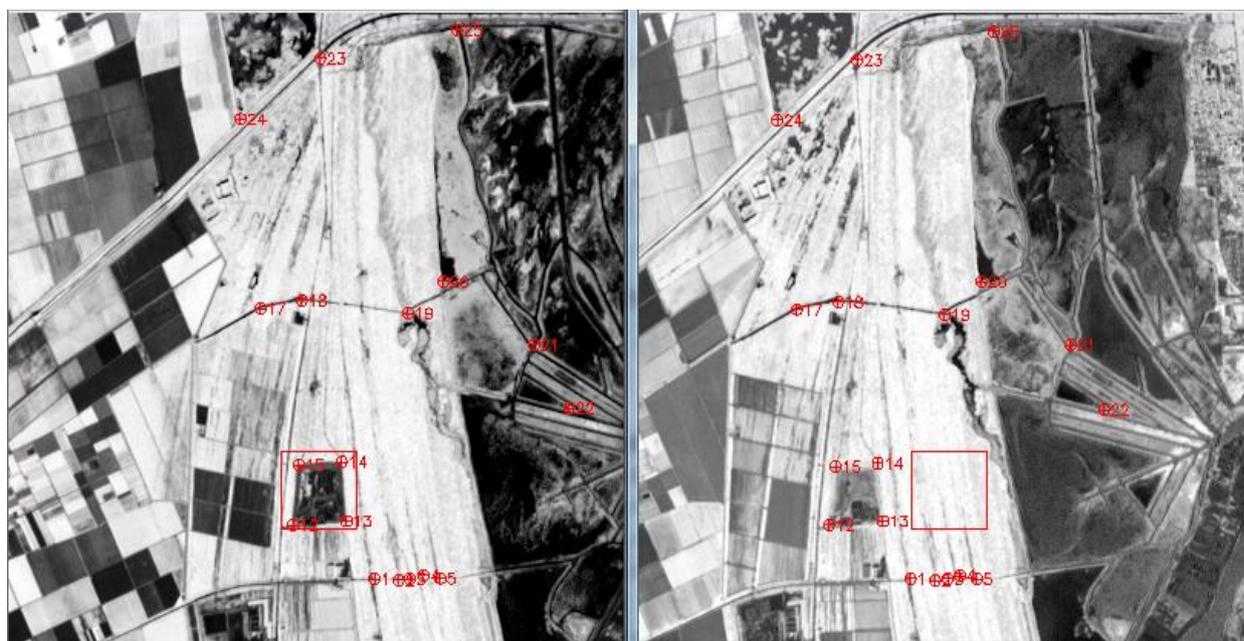


Fig.4.7 Zoom di GCPs

Per un maggior approfondimento sulla funzione **Select GCPs: Image to Image** si rimanda al manuale *ENVI User's Guide*.

4.2 Elaborazione del dato satellitare

Per potere ottenere i dati necessari al conseguimento dello scopo di questa tesi e verificare la attendibilità della metodologia applicata si sono dovuti seguire determinati passaggi. Le operazioni relative a tali passaggi sono le seguenti:

a) Realizzare mappe degli indici della vegetazione

Per analizzare l'effetto dell'intrusione di acqua salata nell'acquifero sulla vegetazione sono state realizzate mappe relative a ogni indice preso in esame. Tale operazione è permessa dalla funzione *Band Math* in *Basic Tools* che consente di realizzare operazioni lineari tra le diverse bande dell'immagine satellitare, come sommarle, moltiplicarle, sottrarne una all'altra, realizzare un rapporto.

L'immagine restituita è composta da una sola matrice, delle stesse dimensioni di quelle delle bande utilizzate, che presenta all'interno di ogni pixel il valore corrispondente al risultato dell'espressione matematica scelta e alle bande selezionate come variabili float interne; di conseguenza tale immagine è rappresentabile solamente in toni di grigio.

L'espressione utilizzata che descrive l'indice della vegetazione NDVI è la seguente:

$$(\text{float}(b1-b2)/\text{float}(b1+b2))$$

dove $b1$ e $b2$ sono le due bande scelte.

Di seguito si riportano a esempio nella Fig.4.8 l'immagine a colori naturali RGB confrontata con quelle relative agli Indici di NDVI ottenuti col dato WV-2 con le seguenti combinazioni:

➤ $b1 = \text{NIR1}$, $b2 = \text{RED}$

➤ $b1 = \text{NIR1}$, $b2 = \text{RED-EDGE}$

Si ricorda che l'indice NDVI varia tra -1 e 1, mentre le rappresentazioni in scala di grigio hanno come estremi il nero e il bianco. Di conseguenza nelle immagini relative al NDVI tonalità di grigio più scure, tendenti al nero, indicano valori di DN negativi;

mentre tonalità di grigio più chiare, tendenti al bianco, coincidono con valori di DN alti e prossimi all'unità.

Per un maggior approfondimento sulla funzione *Band Math* si rimanda al manuale *ENVI User's Guide*.

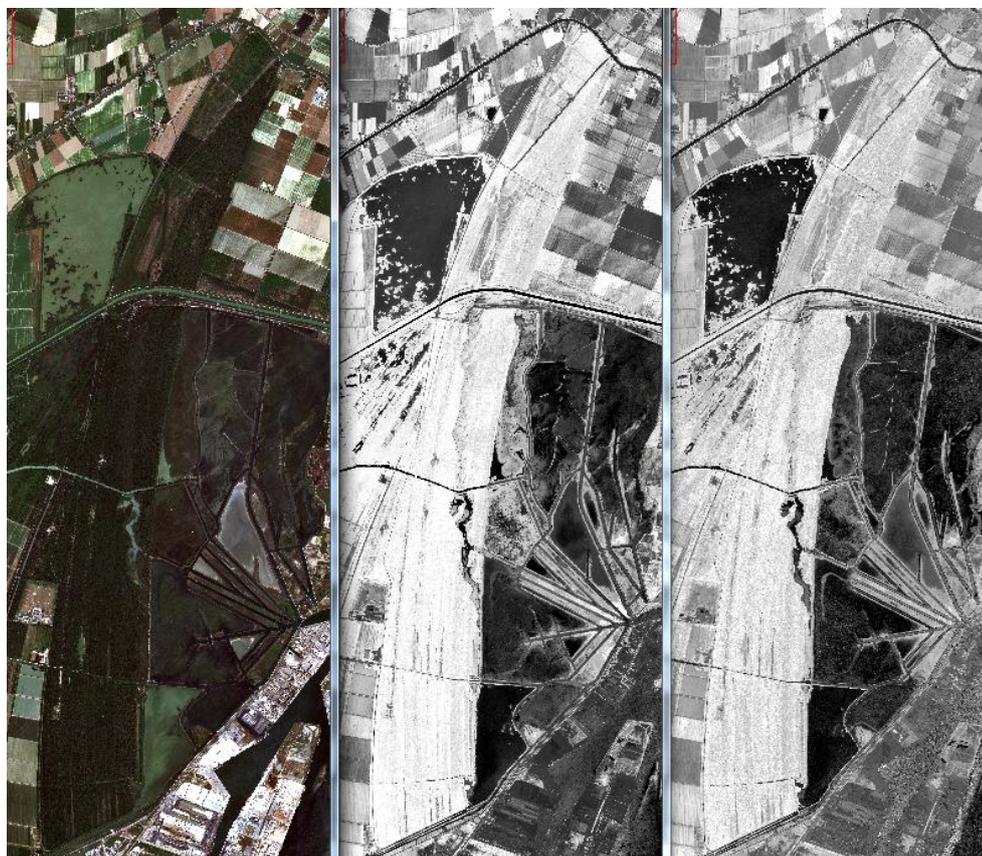


Fig.4.8 Immagini RGB a colori naturali, mappa di N1R, mappa di N1RE

b) Creazione delle ROI (Region of Interest)

Il termine ROI è specifico del software ENVI; le Regioni di Interesse servono per individuare zone sull'immagine di particolare interesse, rappresentative del problema che si vuole affrontare e studiare.

Tali regioni si realizzano selezionando la funzione *Region of Interest* in *Basic Tools*; per la loro creazione ENVI fornisce differenti opportunità, quella scelta è la creazione tramite poligoni. Il software realizza tali ROI basandosi sia sulle coordinate dei vertici del poligono disegnato dall'utente, sia sulle dimensioni del pixel dell'immagine in esame; per questo motivo affinché si possano sovrapporre le ROI realizzate in un'immagine su un'altra è necessario che le due immagini siano coregistrate e abbiano la stessa risoluzione spaziale.

In questo lavoro come ROI di partenza sono state prese quelle definite nell'elaborato (Barbarella et al., 2013) riferite all'immagine Aster del 2005 scelte in quanto presentano copertura della vegetazione omogenea. Dalla Carta della Vegetazione, Fig.4.9, si nota come le ROI si sovrappongono a zone per la maggior parte coperte da vegetazione autoctona TDF (Thermophilic Deciduous Forest), nelle quali si riscontra anche la presenza di piante alloctone di *Pinus Pinea* (pino domestico) a causa della complessa composizione della pineta. La risoluzione spaziale di Aster non ha permesso un'analisi a livello di dettaglio maggiore.

A seguito della coregistrazione sono sovrapposte anche ai dati Aster del 2011.

Per definire le stesse ROI nel dato WV-2, a causa della differente risoluzione spaziale, è stato necessario:

- convertirle nel formato vettoriale di ENVI .evf con la funzione *Export ROIs to EVFs in Region of Interest*;
- caricare il vettoriale sull'immagine Wv-2 con la funzione *Open Vector File* nel menù *Vector*;
- creare le ROI col puntatore ricalcando i vertici dei poligoni vettoriali ottenuti da quelle di riferimento.

Tale procedura è possibile perché entrambi i dati, Aster e WV-2, sono nel sistema di proiezione UTM-33 del datum WGS-84. Le ROI considerate

sono riportate nella figura Fig.4.9 e vengono denominate: CN1(verde), CN2(blu), CS1(giallo), CS2(azzurro), S(magenta).



Fig.4.9 ROI sovrapposte a RGB di WV-2 e alla vegetazione TDF (aree in arancione) ottenute dalla carta della vegetazione

Per un maggior approfondimento sulla funzione *Region of Interest* si rimanda al manuale *ENVI User's Guide*.

c) Estrarre i valori dei pixel interni alle ROI

Per potere eseguire delle elaborazioni statistiche e comprendere i dati a nostra disposizione è necessario estrarre i valori numerici contenuti nei pixel appartenenti alle nostre ROI. A tale scopo ENVI mette a disposizione la funzione *Output ROIs to ASCII* la quale ti permette anche di decidere che tipologia di dati esportare. Per immagini georeferenziate i parametri a disposizione sono: Point (ID del pixel), ROI Location (coordinate immagine X, Y del pixel), Map Location (coordinate cartografiche E, N del pixel), Geo Location (coordinate geografiche Latitudine, Longitudine del pixel) , Band Values (valore del DN delle bande utilizzate, o della combinazione, per quell'immagine). Di seguito si riportano i parametri scelti per l'esportazione dei dati in questa tesi.

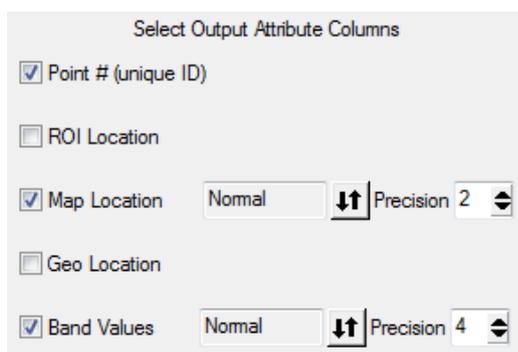


Fig.4.10 Attributi di *Output ROIs to ASCII*

Il risultato di tale operazione è un file .txt ,contenente i parametri selezionati e il numero di pixel totali esportati, importabile in un foglio di lavoro. Si è scelto di generare separatamente un file .txt per ogni ROI analizzata relativamente a ognuna delle immagini utilizzate. Infatti i valori esportati sono relativi all' immagine sulla quale le ROI sono caricate momentaneamente.

Le immagini sfruttate a tale scopo sono state quelle relative agli indici della vegetazione di NDVI sfruttando le seguenti combinazioni:

- Aster: NIR, RED (N1R-A);
- WV-2: NIR1, RED (N1R-W);
- WV-2: NIR1, RED-EDGE (N1RE);
- WV-2: NIR2, RED (N2R);
- WV-2: NIR2, RED-EDGE (N2RE).

Per un maggior approfondimento sulla funzione *Output ROIs to ASCII* si rimanda al manuale *ENVI User's Guide*.

d) Elaborare statisticamente i dati ottenuti

Le elaborazioni statistiche sono realizzate all'interno di un foglio di calcolo partendo dall'importazione dei file .txt relativi a ciascuna ROI; inoltre viene creato un foglio per ogni immagine di NDVI utilizzata.

Gli elementi calcolati sono gli stessi per tutte le ROI e gli NDVI applicati.

I parametri, relativi all'analisi statistica iniziale, calcolati per ciascuna ROI sono:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard;
- Istogramma di frequenza relativa.

Si utilizza la frequenza relativa con lo scopo di rendere confrontabili gli istogrammi anche se appartenenti a differenti ROI e differenti dati satellitari.

Per ogni immagine di NDVI viene calcolato:

- valore minimo assoluto;
- valore massimo assoluto.

Per gli indici di NDVI ritenuti meglio rappresentabili della situazione e portatori di informazioni non ridondanti N1R-A, N1R-W, N1RE, si attua un'ulteriore e più raffinata analisi statistica dove vengono calcolati per ogni ROI relativa a tale indice anche:

- il valore di NDVI corrispondente al 5Percentile della ROI con valore di medio maggiore;
- la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI;
- i momenti del II ordine Skewness e Kurtosis.

Il valore del 5Percentile è quel valore di NDVI al di sotto del quale si trova il 5% dei pixel appartenenti alla ROI che, avendo Valore Medio maggiore di Indice, corrisponde presumibilmente alla situazione di salute migliore per la vegetazione tra le aree considerate. Di conseguenza viene assunto come limite di NDVI sotto al quale si

presentano valori di DN corrispondenti a vegetazione in condizioni di stress.

Il momento del II ordine Skewness descrive l'asimmetria della distribuzione del set di dati analizzati; valore nullo indica una distribuzione simmetrica, valore negativo coincide con la formazione di una coda a sinistra verso i valori minori, valore positivo è segno dello sviluppo di una coda a destra verso i valori maggiori.

Il momento del II ordine Kurtosi evidenzia un allontanamento dalla normalità distributiva. Il valore dell'indice corrispondente alla distribuzione normale (gaussiana) è 0, se si verifica un maggiore appiattimento (distribuzione platicurtica) il valore diventa negativo, se al contrario è presente un maggiore allungamento (distribuzione leptocurtica) assume valori positivi.

Dato che diversi studi hanno dimostrato che la salinità è il principale fattore di stress sulla pineta, come descritto precedentemente nel capitolo 3, per le immagini relativi agli Indici N1R-A, N1R-W, N1RE, si analizzano i risultati in relazione ai dati di salinità.

Il confronto avviene:

- Applicando alle mappe ottenute dalle curve isosaline le stesse ROI;
- Definendo classifiche ottenute in funzione dei valori medi;
- Creando un grafico di dispersione con linea di tendenza o regressione lineare.

4.3 Isosaline

La realizzazione delle isosaline e delle relative mappe di salinità per le acque sotterranee, è avvenuta mediante il software Surfer; le isosaline sono curve formate da punti che presentano lo stesso valore di concentrazione di sale.

Surfer è un software utilizzato per il Contouring, Gridding, e Surface Mapping. Permette di convertire i dati di *input* in diversi tipi di *output*: mappe tridimensionali e reticolari, importando le mappe base con informazioni geografiche e sovrapponendo i propri dati; mappe di livello; mappe vettoriali; mappe tematiche; mappe territoriali. La mappa può essere scelta tra quelle in archivio o creata miscelando gli elementi provenienti da diverse mappe di altre sorgenti; può essere poi personalizzata in tutti i suoi elementi al fine di arrivare al risultato desiderato.

Nel caso dei dati di salinità trattati in questo caso, essendo dati puntuali è stato necessario convertirli in dati spazialmente continui.

Il metodo di interpolazione scelto per la generazione del Grid, a partire dai Dati di Pozzo, è il Kriging: metodo di regressione usato nell'ambito dell'analisi spaziale (geostatistica) che permette di interpolare una grandezza nello spazio, minimizzando l'errore quadratico medio. Sono stati generati due differenti grigliati: il primo con cella quadrata di lato 14.64 metri per la sovrapposizione ai dati da Aster, il secondo con cella quadrata di lato 2 metri per il confronto con dati WV-2.

I Grid vengono tagliati sulla zona di interesse, ovvero la pineta di San Vitale, attraverso la funzione *Blank* e successivamente si estraggono attraverso la funzione *Extract* i dati relativi a ciascuna ROI. L'operazione di estrazione deve essere preceduta da un *Blank*, taglio, relativo alle singole ROI importate nel software in formato vettoriale.

I dati vengono esportati in un file *.txt*, che contiene per ogni nodo estratto all'interno della ROI le coordinate cartografiche E,N e il valore di salinità; per ciascuna Roi viene realizzato un file *.txt*.

Le analisi statistiche compiute, sui dati provenienti da entrambi i Grid, per ogni ROI sono:

➤ Valore minimo;

- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard;
- Istogramma di frequenza relativa.

Le principali isosaline sono state esportate come file vettoriale dal software Surfer e sovrapposte nel software QGis agli shapefiles della pineta di San Vitale e delle ROI.

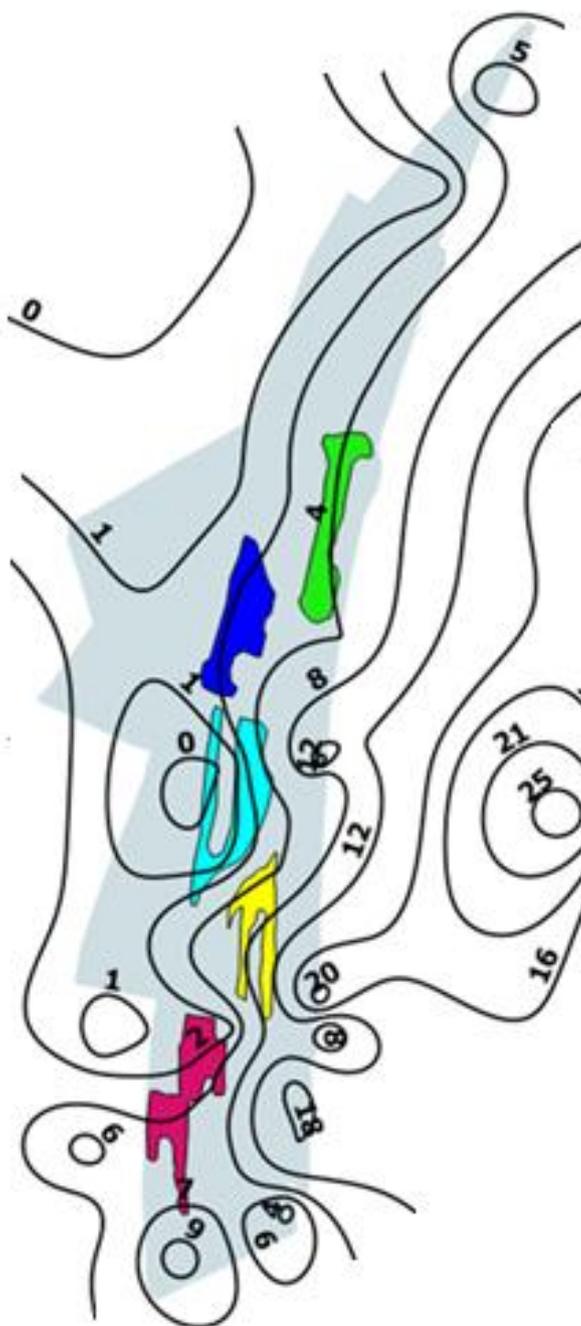


Fig.4.11 Isosaline (nere) ottenute dai punti di campionamento sovrapposte allo shapefile della pineta di San Vitale (grigio) con le ROI

5 RISULTATI DELLE ELABORAZIONI

5.1 Salinità

I dati di salinità relativi a ciascuna ROI, esportati in un file.txt contenente per ogni nodo estratto le coordinate cartografiche E,N oltre al valore di salinità, vengono sottoposti ad analisi statistica per comprendere l'andamento del fattore di stress studiato all'interno della pineta.

Le analisi statistiche vengono compiute su i Grid realizzati in accordo con le risoluzioni geometriche dei dati, 15 metri e 2 metri, descritti nel capitolo precedente.

Nelle tabelle seguenti Tab.5.1 si riportano i risultati ottenuti, per entrambe le risoluzioni, relativi a:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	Salinità							
	15m				2m			
	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.
CN1	3.0861	5.4937	3.9036	0.4697	3.0676	5.5692	3.9033	0.4725
CN2	1.5260	3.2157	2.1890	0.3269	1.5165	3.2553	2.1907	0.3263
CS1	3.0966	12.1297	7.1033	2.5488	3.0546	12.1588	7.1240	2.5637
CS2	0.0011	5.0983	1.7680	1.1910	0.0000	5.2225	1.7664	1.2013
S	1.2481	7.3702	3.4341	1.4542	1.2467	7.4042	3.4247	1.4646

Tab.5.1 Valori minimi, massimi, medi di salinità e deviazioni standard per ciascuna ROI alla risoluzione di 15 metri e 2 metri. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

Per ciascun grigliato, in rosso sono evidenziate le situazioni peggiori, dal punto di vista della salinizzazione delle acque, corrispondenti ai valori medi di salinità maggiori, mentre in verde quelle migliori, corrispondenti ai valori medi di salinità minori.

Di conseguenza prendendo come riferimento il valore medio si definisce la classifica tra le ROI partendo da quella sottoposta ad uno stress inferiore fino ad arrivare a quella più compromessa:

1°	CS2
2°	CN2
3°	S
4°	CN1
5°	CS1

Tab.5.2 Classifica ottenuta considerando in ordine crescente i valori medi della salinità 2011

Lo studio del valore minimo, medio e massimo evidenzia come le condizioni di maggior stress per la vegetazione a causa della salinità si riscontrano in CN1 e CS1. In queste ROI il valore minimo è superiore a 3 g/l; quello medio per CN1 risulta prossimo a 4 g/l, mentre per CS1 supera i 7 g/l. Nella ROI CS1 è da sottolineare come si trovino valori superiori a 10 g/l, il valore massimo infatti risulta pari a 12.13 g/l, di conseguenza si incontra una condizione di forte stress per le piante. Le ROI CN2 e CS2 presentano valori bassi di concentrazione di sale, rispettivamente leggermente superiore e inferiore a 2 g/l; in S si riscontra una situazione intermedia, la salinità media è circa 3.4 g/l.

Osservando i valori minimi e massimi di ciascuna ROI si nota come le aree nella parte nord della pineta CN1 e CN2 presentino dati più concentrati all'interno di un intervallo di circa 2 g/l; mentre spostandosi verso sud le ROI presentano intervalli maggiori di concentrazione salina. In CS2 il range è di circa 5 g/l, in S di 6 g/l, mentre in CS1 si arriva a 9 g/l. Questa situazione è confermata dai valori di deviazione standard in Tab.5.1.

Di conseguenza come parametro il valore medio risulta essere più significativo per le ROI a nord rispetto a quelle situate più a sud, per le quali si sfruttano gli istogrammi di frequenza relativa, riportati di seguito in Fig.5.1, per comprendere meglio l'andamento del fattore di stress.

Dai valori in entrambe le tabelle si nota come la dimensione della cella sia ininfluyente; infatti le risoluzioni a 15 metri e a 2 metri restituiscono gli stessi risultati; questo si può notare anche dall'andamento degli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.1.

Dalla classifica ottenuta dalla Tab.5.1 si osserva come la salinità sia maggiore nelle ROI situate a est della pineta, più vicine alla Piallassa, CN1 e CS1, mentre diminuisce spostandosi verso ovest nelle ROI S, CN2, CS2; di conseguenza si può affermare che esiste un

gradiente di concentrazione salina da ovest verso est all'interno della pineta.

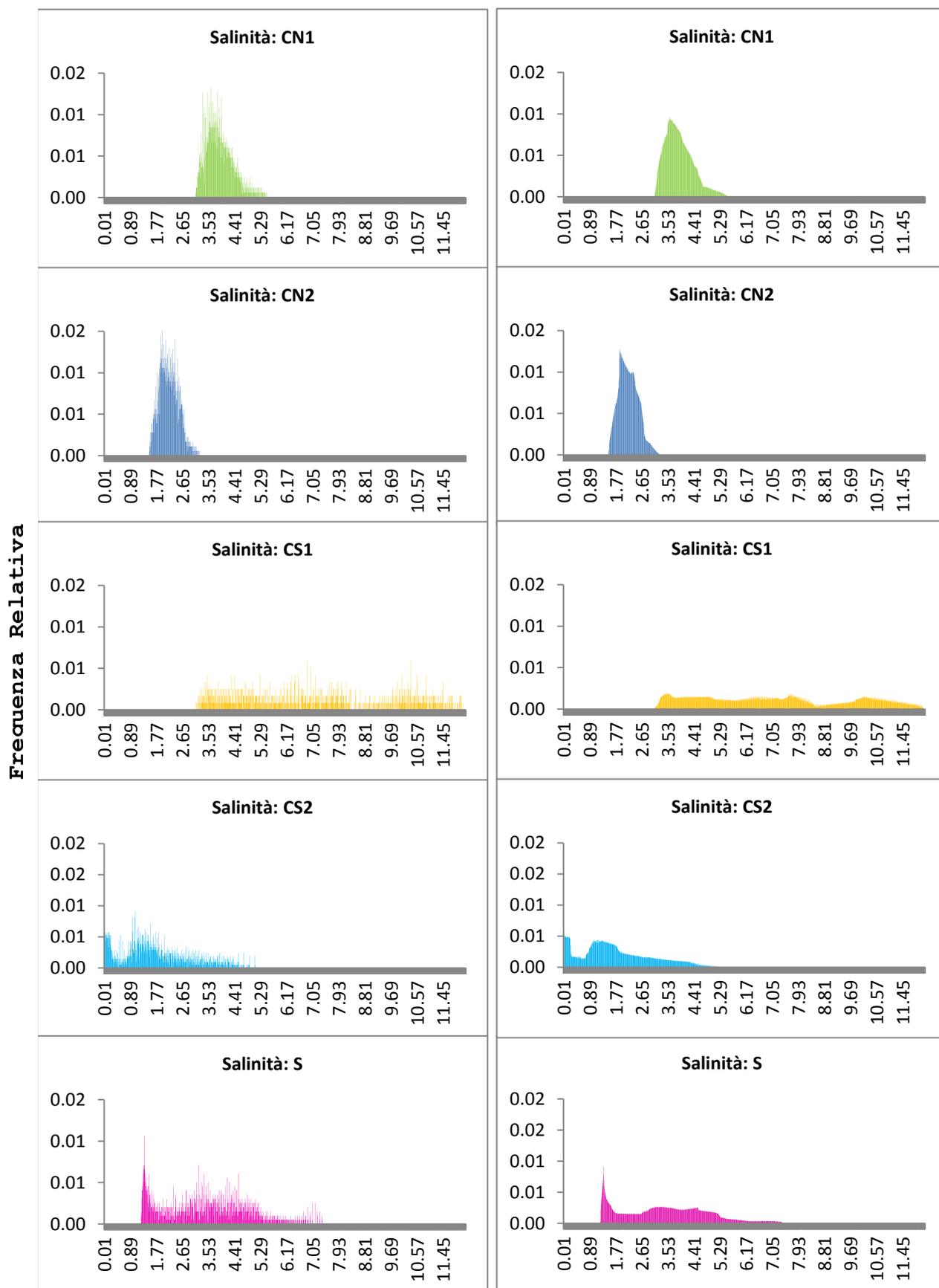
La stessa situazione di gradiente si osserva nei dati relativi all'elaborato (Barbarella et al., 2013) riferiti al 2005, sebbene si abbiano valori differenti in termini assoluti e la situazione peggiore sia in CN1. Queste differenze possono essere imputabili al differente metodo di campionamento e ai diversi punti di campionamento utilizzati nelle due epoche.

Si riporta in Tab.5.3 il confronto tra il 2005 e il 2011, entrambe con risoluzione di 15 metri, evidenziando in rosso i valori più alti e in verde quelli più bassi.

AREA	Salinità 2005	Salinità 2011
	MEDIO	MEDIO
CN1	6.8200	3.9036
CN2	1.0000	2.1890
CS1	5.7800	7.1033
CS2	0.4700	1.7680
S	4.0400	3.4341

Tab.5.3 Confronto valori medi di salinità al 2005 e al 2011. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

In conclusione si può affermare che, tenendo presente il cambiamento del metodo di campionamento utilizzato e il differente posizionamento dei punti di analisi su cui si basa il processo di interpolazione, la concentrazione salina nelle acque sotterranee è rimasta quasi invariata nel tempo presentando in entrambe le epoche un gradiente da ovest verso est all'interno della pineta.



Salinità

Fig.5.1 Istogrammi di frequenza relativa dei dati di salinità a 15m(sx) e 2m(dx) per ciascuna ROI.

Asse delle ascisse: Salinità (g/l); asse delle ordinate: Frequenza Relativa

5.2 NDVI: confronto tra Aster e WV-2

Il confronto dei risultati, ottenuti dalle due tipologie di immagini satellitari ad alta e media risoluzione, avviene analizzando l'indice della vegetazione NDVI ottenuto dalla combinazione delle bande NIR1 (Infrarosso, 0.78-0.86 μm) e RED (0.63-0.69 μm); in quanto entrambi i sensori supportano tali bande.

Le immagini prese in considerazione sono: per WV-2 l'unica a disposizione datata 29/05/2011 e per Aster quella del 27/05/2011 più vicina temporalmente al dato WV-2. Per il dato Aster l'indice viene denominato N1R-A, mentre per il dato WV-2 N1R-W. Come spiegato precedentemente nel Capitolo 2, valori bassi dell'indice mostrano situazioni di maggiore stress per la vegetazione: al crescere di tali valori la condizione di salute delle piante migliora.

I dati di N1R-A e N1R-W relativi a ciascuna ROI, esportati in un file .txt contenente per ogni nodo estratto le coordinate cartografiche E,N oltre al Valore di NDVI, vengono sottoposti ad analisi statistica per studiare il comportamento di riflettanza della vegetazione in funzione della condizione di stress all'interno della pineta.

Nelle tabelle seguenti Tab.5.4 si riportano i risultati ottenuti dall'analisi statistica sulle immagini relative a entrambi gli indici:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	N1R-A				N1R-W			
	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.
CN1	0.4708	0.7729	0.6967	0.034	0.3927	0.9148	0.8050	0.055
CN2	0.5509	0.7798	0.7106	0.035	0.1669	0.9168	0.8260	0.058
CS1	0.5686	0.7859	0.7262	0.033	0.1567	0.9283	0.8374	0.053
CS2	0.6322	0.7917	0.7435	0.020	0.2993	0.9229	0.8502	0.039
S	0.6108	0.8017	0.7252	0.034	-0.0858	0.9818	0.8286	0.056

Tab.5.4 Valori minimi, valori massimi, valori medi e deviazioni standard per ciascuna ROI di N1R-A(27/05/11) e N1R-W(29/05/11). In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

In rosso sono evidenziate le situazioni peggiori, corrispondenti ai valori medi minori per ciascun indice, mentre in verde quelle migliori, corrispondenti ai valori medi maggiori per ciascun indice.

I risultati ottenuti con l'alta risoluzione, N1R-W, rispecchiano quelli ricavati con la media, N1R-A, : per entrambi i dati la ROI più sofferente è CN1 (N1R-A pari a 0.6967 e N1R-W uguale a 0.8050) mentre quella che presenta valore medio maggiore dell'indice è CS2 (N1R-A pari a 0.7435 e N1R-W uguale a 0.8502).

Le deviazioni standard rispetto al valore medio risultano essere minori di 0,06 per tutte le ROI in entrambi gli indici, di conseguenza il valore medio si assume rappresentativo della situazione interna a ciascuna ROI sia per N1R-A, sia per N1R-W.

Basandosi su questo valore si definisce la classifica tra le ROI dalla migliore alla peggiore, la classifica risulta essere la stessa sia con l'alta, sia con la media risoluzione:

1°	CS2
2°	CS1
3°	S
4°	CN2
5°	CN1

Tab.5.5 Classifica delle ROI ottenuta dai valori medi di N1R 2011, in ordine decrescente

Per verificare un' eventuale evoluzione della situazione di stress nella vegetazione, all'interno della pineta di San Vitale, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ricavati dalla medesima analisi sull'indice N1R del dato Aster del 26/05/2005, acquisito nello stesso periodo dell'anno.

AREA	N1R-A (26/05/05)	N1R-A (27/05/11)	N1R-W (29/05/11)
CN1	0.8038	0.6967	0.8050
CN2	0.8242	0.7106	0.8260
CS1	0.8386	0.7262	0.8374
CS2	0.8583	0.7435	0.8502
S	0.8342	0.7252	0.8286

Tab.5.6 Valori Medi del N1R-A(26/05/05), N1R-A(27/05/11), N1R(29/05/11) per ciascuna ROI. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

Le immagine relative al 2011 confermano la classifica ottenuta al 2005 ovvero una situazione migliore nella parte sud della pineta, CS2(0.8583), CS1(0.8386), S(0.8342), e un peggioramento spostandosi a nord, CN2(0.8242), CN1(0.8038).

Di conseguenza la maggior risoluzione fornita da WV-2, a parità di area considerata e utilizzando come parametro di riferimento il valore medio, non fornisce ulteriori informazioni rispetto ad Aster. Nonostante l'utilizzo di un dato ad alta risoluzione spaziale le problematiche e le incertezze incontrate al 2005 permangono anche nel 2011: in entrambe le epoche infatti non si verifica una perfetta correlazione tra la salinità, principale fattore di stress nella pineta, e l'indice N1R.

	Salinità	N1R
1°	CS2	CS2
2°	CN2	CS1
3°	S	S
4°	CN1	CN2
5°	CS1	CN1



Salinità crescente
N1R decrescente

Tab.5.7 Confronto classifiche delle ROI ottenute con i valori medi, dalla situazione migliore alla peggiore, della salinità e dell'indice N1R

Si ipotizza che la mancata correlazione sia dovuta alla presenza di altri fattori di stress presenti all'interno della pineta (Barbarella et al., 2013). La morfologia del suolo è caratterizzata dalla presenza di paleodune che comportano, in funzione di dove è situata la pianta, un differente spessore della zona vadosa che influisce sullo stato di salute della pianta. Si ricorda che la zona vadosa (o insatura) è la porzione della terra che si estende fra il piano campagna e la zona satura sottostante in cui è presente l'acquifero. In tale zona i pori tra i granuli di terreno sono parzialmente riempiti con acqua che filtra lentamente verso il basso per gravità; il restante spazio dei pori libero dall'acqua è occupato dall'aria. Di conseguenza un maggior spessore di zona vadosa comporta una maggiore distanza tra le radici e l'acquifero contenente acqua salata.

Un ulteriore fattore da considerare è la densità delle piante di pino che si trovano, a prescindere dalla salinità, in una condizione di stress.

La presenza di queste piante all'interno della ROI influenza la risposta spettrale della vegetazione che viene registrata dal sensore. Da rilievi fatti all'interno della pineta è emersa una maggiore presenza di Pini nelle aree a nord relative alle ROI CN1 e CN2, una

minore densità verso sud nelle aree corrispondenti a CS2 e CS1, mentre nella ROI S più a sud si riscontra una situazione intermedia.

	ROI	DENSITA' PINI
1°	CS2	5.8
2°	CS1	7.6
3°	S	14.1
4°	CN2	19.8
5°	CN1	25.2

Tab.5.8 Densità dei pini (n°/ha) per ciascuna ROI, in ordine crescente

Queste osservazioni, abbinate alla concentrazione della salinità, forniscono una probabile spiegazione della classifica stilata dai risultati ottenuti con l'indice N1R in entrambe le tipologie di immagini.

5.2.1 Anomalia nei valori assoluti di NDVI nel dato Aster del 27/05/2011

Rivolgendo l'attenzione solo sui dati Aster si osserva un shift dei valori medi del 2011, rispetto al 2005, verso valori più bassi che farebbe pensare a un peggioramento delle condizioni della vegetazione. Utilizzando il dato WV-2 questo abbassamento non si verifica e i valori risultano prossimi a quelli ottenuti con l'Aster del 2005. Per analizzare questa incongruenza relativa all'Aster del 27/05/2011 si sono svolte le stesse analisi statistiche per i dati Aster del 18/05/2011 e del 28/06/2011. In Tab.5.9 si riportano i risultati ottenuti.

AREA	N1R-A (26/05/05)		N1R-A (18/05/11)		N1R-A (27/05/11)		N1R-W (28/06/11)	
	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.
CN1	0.8038	0.033	0.7994	0.030	0.6967	0.034	0.7661	0.030
CN2	0.8242	0.034	0.8131	0.032	0.7106	0.035	0.7826	0.033
CS1	0.8386	0.028	0.8232	0.026	0.7262	0.033	0.7822	0.032
CS2	0.8583	0.019	0.8405	0.017	0.7435	0.020	0.8019	0.018
S	0.8342	0.031	0.8209	0.029	0.7252	0.034	0.7728	0.033

Tab.5.9 Valori medi e deviazioni standard di N1R-A alle diverse epoche per ciascuna ROI. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

Dalla Tab.5.9 si nota come i dati Aster del 18/05/2011 e del 28/06/2011 restituiscono risultati in accordo, seppur nel secondo caso con valori leggermente inferiori dovuti probabilmente alla minore

attività fotosintetica estiva, con quelli di Aster del 26/05/05 e di WV-2 del 29/05/2011. Considerando le due ROI estreme CS2 e CN1 i valori medi ottenuti in ordine temporale sono rispettivamente (0.8583, 0.8405, 0.7435, 0.8019) e (0.8038, 0.7994, 0.6967, 0.7661).

Anche le deviazioni standard in Tab.5.9 mostrano un totale accordo tra le epoche analizzate e risultano tutte inferiori a 0.04, di conseguenza il valore medio di N1R-A si assume rappresentativo della situazione interna a ciascuna ROI per ciascuna epoca.

Per l'immagine Aster del 28/06/2011 non è stata fatta nessuna ulteriore analisi in quanto relativa a un diverso mese e quindi a condizioni fenologiche differenti della vegetazione.

In Fig.5.2 si mostrano le Mappe di N1R-A(26/05/05), N1R-A(18/05/11), N1R-A(27/05/11) e di N1R-W con applicata la stessa palette per una visualizzazione grafica di quanto descritto in precedenza; l'immagine relativa al 27/05/11 risulta avere valori di DN inferiori in tutta la pineta rispetto alle altre.

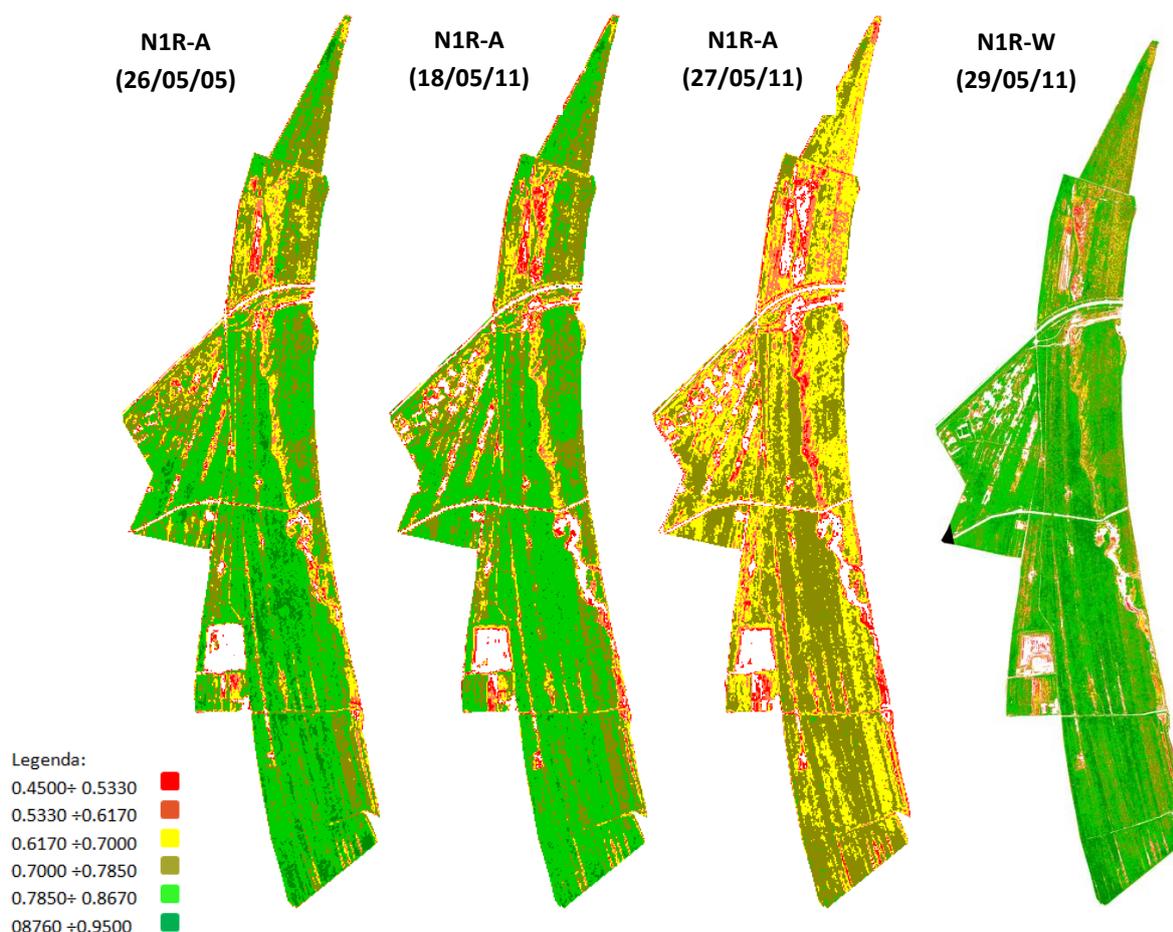


Fig.5.2 Mappe di N1R-A(26/05/05), N1R-A(18/05/11), N1R-A(27/05/11) e di N1R-W con applicata la stessa palette

Dato che l'indice ottenuto dalla combinazione della banda del RED e del NIR, sono state analizzate entrambe le bande, nei dati Aster del 18/05/2011 e del 27/05/2011, per capire l'anomalia verificata.

AREA	RED (18/05/11)		NIR1 (18/05/11)		RED (27/05/11)		NIR1 (27/05/11)	
	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.	MEDIO	DEV.ST.
CN1	330.678	27.249	3009.701	346.058	603.981	31.176	3411.075	333.823
CN2	323.255	34.015	3181.968	337.061	600.158	39.302	3579.752	320.728
CS1	309.545	24.906	3232.326	312.895	563.732	31.070	3588.757	327.136
CS2	302.091	23.955	3502.223	238.916	565.707	27.329	3858.844	225.408
S	311.888	32.485	3212.682	348.766	562.222	40.510	3565.025	350.934

Tab.5.10 Valori medi e deviazioni standard della banda RED e NIR1 al 18/05/11 e al 27/05/11 per ciascuna ROI

Dalla Tab.5.10 si evince come i valori presenti nel dato Aster del 27/05/11 siano tutti più alti, shiftati, dei rispettivi valori al 18/05/11. Considerando la ROI corrispondente alla situazione migliore (CS2), i valori medi ottenuti per la banda RED e la banda NIR1 sono rispettivamente 302.091 e 3502.223 per il 18/05/11, e 565.707 e 3858.845 per il 27/05/11. Lo stesso comportamento si riscontra esaminando la ROI corrispondente alla situazione peggiore (CN1), i cui valori medi ottenuti per la banda RED e la banda NIR1 sono rispettivamente 330.678 e 3009.701 per il 18/05/11, e 603.981 e 3411.075 per il 27/05/11.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa di entrambe le bande alle due epoche, lo spostamento delle distribuzioni nel RED è evidente (Fig.5.3 e 5.4).

Il comportamento evidenziato spiega l'abbassamento dei valori dell'indice NIR al 27/05/11, in quanto a denominatore dell'indice è presente la somma dei DN relativi a entrambe le bande, mentre a numeratore la differenza; di conseguenza dividendo il numeratore, che rimane sostanzialmente invariato, per un valore maggiore il DN ottenuto dall'indice risulta minore.

La causa dello shift si può ipotizzare legata a un malfunzionamento del sensore oppure al parametro di visibilità richiesto in input nel modello di correzione atmosferica FLAASH, che in mancanza di dati certi è stato impostato per tutte le immagini pari a 40km, condizioni di sereno.

Successivamente negli approfondimenti statistici saranno considerati entrambi per valutare l'eventuale influenza dello shift riscontrato.

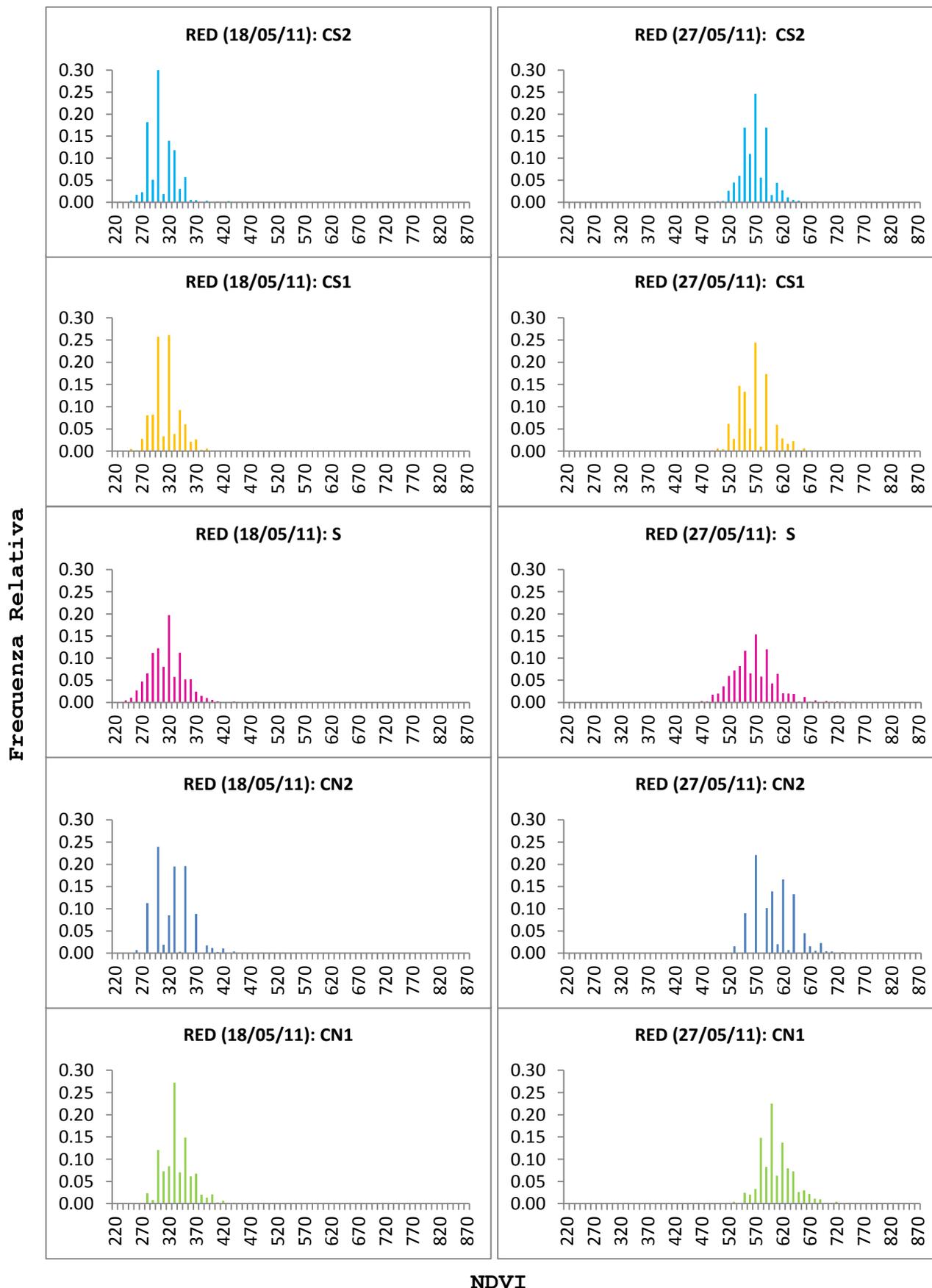
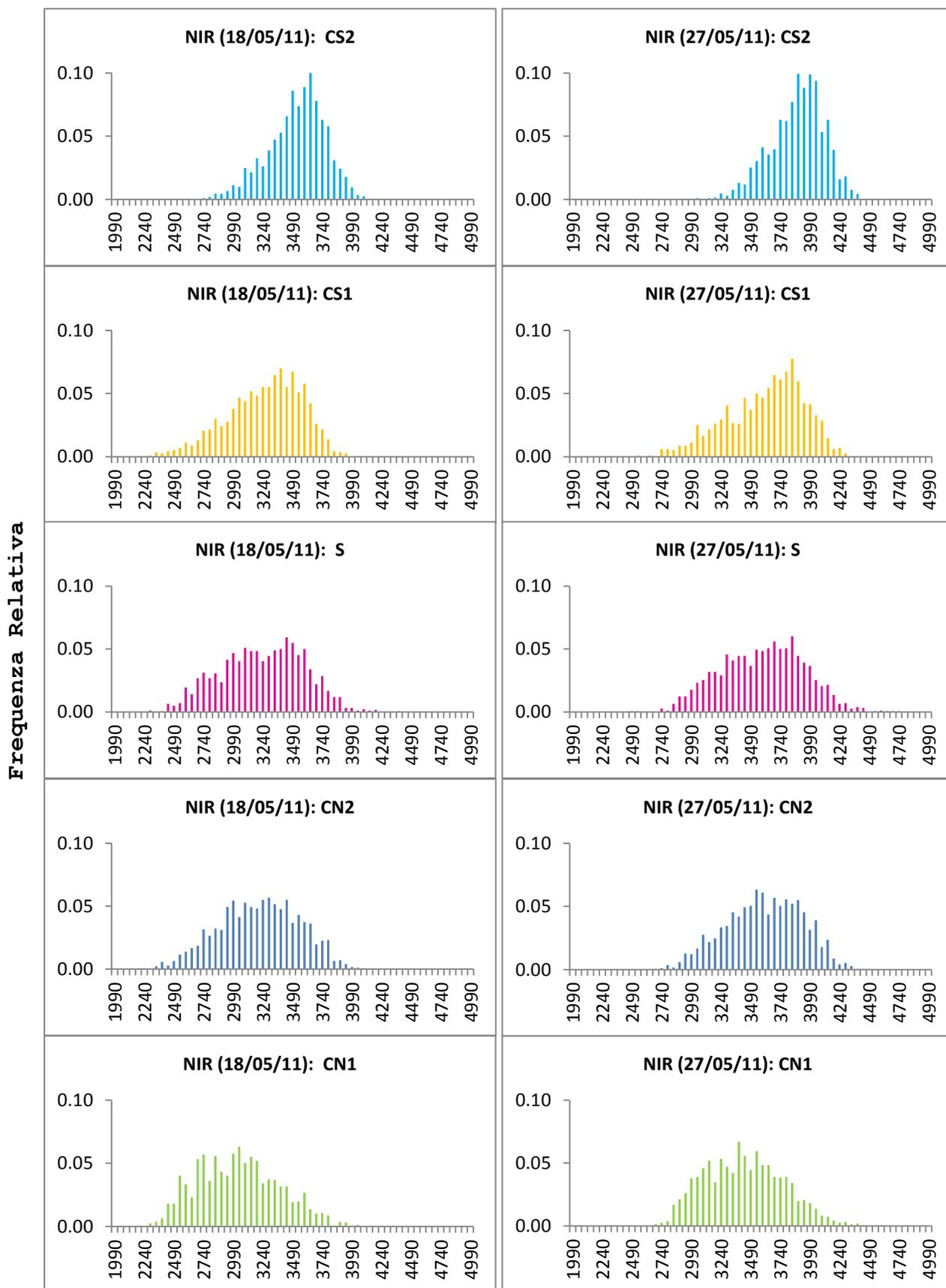


Fig.5.3 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI della banda RED (18/05/11) (sx) e della banda RED (27/05/11) (dx).
 Asse delle ascisse: RED; asse delle ordinate: Frequenza Relativa



NDVI

Fig.5.4 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI della banda NIR1 (18/05/11) (sx) e della banda NIR1 (27/05/11) (dx).

Asse delle ascisse: NIR1 asse delle ordinate: Frequenza Relativa

5.2.2 Correlazione tra NDVI e salinità

Dato che, da studi precedenti, l'intrusione di acqua salata il principale fattore di stress presente in pineta (Antonellini, 2008) si è valutata la correlazione, di tipo lineare, tra i valori medi di salinità e i valori medi degli indici N1R-A(26/05/05), N1R-A(18/05/11), N1R-A(27/05/11), N1R-W(29/05/11), per ciascuna ROI (Fig5.5). Osservando i coefficienti della retta di regressione lineare in Tab.5.11 si conferma come gli indici analizzati abbiano lo stesso comportamento: la correlazione tra salinità e indice NDVI è per tutti negativa.

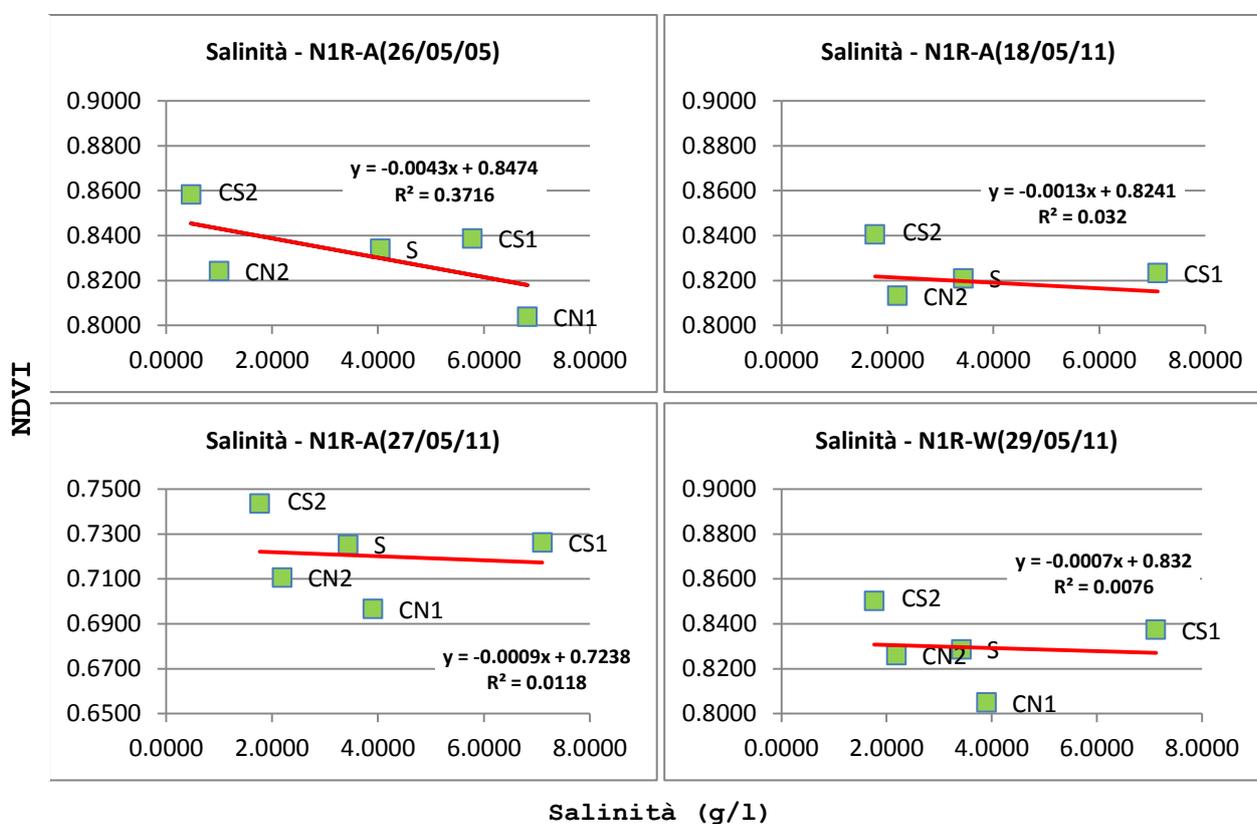


Fig.5.5 Correlazione tra la salinità e valori medi di N1R per ciascuna ROI. Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1R

DATO	RETTA	R ²
N1R-A (26/05/05)	$y=-0.0043x+0.8474$	0.3716
N1R-A (18/05/11)	$y=-0.0013x+0.8241$	0.0320
N1R-A (27/05/11)	$y=-0.0009x+0.7238$	0.0118
N1R-W (29/05/11)	$y=-0.0007x+0.8320$	0.0076

Tab.5.11 Retta di regressione lineare e R² per N1R-A(26/05/05), N1R-A(18/05/11), N1R-A(27/05/11), N1R-W(29/05/11)

5.3 NDVI con le nuove bande del dato in WV-2

La presenza di nuove bande nell'immagine ad alta risoluzione WV-2 permette ulteriori combinazioni all'interno dell'indice della vegetazione NDVI, che verranno indicate con le seguenti sigle:

- N1RE: NDVI con l'uso di NIR1 e RED-EDGE;
- N2R: NDVI con l'uso di NIR2 e RED;
- N2RE: NDVI con l'uso di NIR2 e RED-EDGE.

Anche in questo caso i dati di N1RE, N2R e N2RE relativi a ciascuna ROI sono stati esportati in un file.txt, con le coordinate cartografiche E,N oltre al valore di NDVI, e vengono sottoposti ad analisi statistica per studiare la condizione di stress all'interno della pineta osservando il comportamento di riflettanza della vegetazione.

Nelle tabelle seguenti Tab.5.12 e Tab.5.13 si riportano i risultati ottenuti dall'analisi statistica relativa ai tre nuovi indici:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	N1RE			N2R			N2RE		
	MIN	MAX	MEDIO	MIN	MAX	MEDIO	MIN	MAX	MEDIO
CN1	0.0114	0.5720	0.2980	0.4328	0.9183	0.8120	0.2026	0.4928	0.3156
CN2	-0.2241	0.5562	0.3040	0.0967	0.9197	0.8311	-0.1746	0.5666	0.3182
CS1	0.0029	0.5044	0.2966	0.1667	0.9281	0.8428	0.0900	0.4935	0.3120
CS2	-0.1301	0.5168	0.3129	0.3468	0.9313	0.8545	0.0776	0.5142	0.3269
S	-0.2299	0.5822	0.2991	-0.1619	0.9828	0.8347	-0.2058	0.5467	0.3166

Tab.5.12 Valori minimi, valori massimi, valori medi per ciascuna ROI di N1RE, N2R, N2RE. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

DATO	CN1	CN2	CS1	CS2	S
N1RE	0.041	0.047	0.043	0.041	0.049
N2R	0.052	0.056	0.049	0.037	0.053
N2RE	0.037	0.040	0.037	0.033	0.041

Tab.5.13 Deviazione standard dei valori di N1RE, N2R, N2RE per ciascuna ROI

In rosso sono evidenziati i valori medi minori per ciascun indice considerato, mentre in verde quelli maggiori.

Si osserva come il range di valori medi ottenuti inserendo nella combinazione lineare la banda RED-EDGE sia più ristretto, inferiore a 2 centesimi di NDVI, e spostato verso valori di DN più bassi, circa 0.3; combinando la tradizionale banda del RED l'intervallo dei valori medi ha un ampiezza superiore a 4 centesimi e presenta valori di DN più alti, maggiori di 0.8. Queste differenze non si osservano se a variare è la banda del NIR: sia nell'indice N1RE, sia N2RE l'ampiezza del range di valori medi è il medesimo, circa 2 centesimi, e in entrambi i casi collocato nell'intorno di 0.3, leggermente spostato verso 0.32 nel N2RE. Per le combinazioni che includono la banda RED, N2R e N1R (riportata nel paragrafo precedente), si verifica lo stesso comportamento: sia nell'indice N1R, sia N2R l'ampiezza dell'intervallo di valori medi è il medesimo, circa 4 centesimi, e in entrambi i casi collocato in un intorno superiore a 0.8.

Le deviazioni standard rispetto al valore medio risultano essere contenute per i tre indici, di conseguenza tale parametro si assume rappresentativo della situazione interna alle ROI.

Basandosi sui valori medi si definisce la classifica tra le ROI dalla migliore alla peggiore per i tre indici considerati, ricordando che valori maggiori dell'indice coincidono con condizioni di minore stress della vegetazione.

Le classifiche ottenute vengono confrontate con quelle dell'indice N1R-W e della salinità, descritte precedentemente, per avere la visione totale delle informazioni ottenibili con il dato ad alta risoluzione, Tab.5.14.

	Salinità	N1R	N1RE	N2R	N2RE
1°	CS2	CS2	CS2	CS2	CS2
2°	CN2	CS1	CN2	CS1	CN2
3°	S	S	S	S	S
4°	CN1	CN2	CN1	CN2	CN1
5°	CS1	CN1	CS1	CN1	CS1



Salinità crescente
NDVI decrescente

Tab.5.14 Confronto classifiche ottenute con i valori medi di salinità, di N1R-W, di N1RE, di N2R, di N2RE; dalla situazione migliore alla peggiore

Dalla Tab.5.14 si nota come combinando la banda del RED sia con la banda NIR1, sia con la NIR2 si ottenga la stessa classifica delle ROI per entrambi gli indici. Con queste combinazioni si riscontra una situazione migliore nella parte sud della pineta, CS2, CS1, S, e un

peggioramento spostandosi a nord, CN2, CN1; di conseguenza si ripropone la discordanza rispetto al gradiente di salinità, come si può osservare in Tab.5.16 dal confronto delle rispettive classifiche; inoltre viene mantenuta la corrispondenza con l'andamento della densità dei pini all'interno della pineta (Tab.5.8).

Si ricorda che nella pineta si trova una maggiore presenza di pini nelle aree a nord (CN1 e CN2), una minore densità verso sud (CS2 e CS1), mentre più a sud (S) si riscontra una situazione intermedia.

Si può affermare che l'indice N2R, utilizzando come parametro di riferimento la media, non fornisce ulteriori informazioni rispetto all'indice N1R; ma al contrario permangono gli stessi dubbi e incertezze legati agli altri fattori di stress presenti in pineta e descritti nel paragrafo precedente.

Anche combinando la banda del RED-EDGE sia con la banda NIR1, sia con la NIR2 si ottiene per entrambi gli indici, in riferimento al valore medio, la stessa classifica delle ROI; in questo caso però l'ordine ricavato è pienamente concorde con quello stilato analizzando i valori medi di salinità (Tab.5.16): CS2 (1.76 g/l), CN2 (2.19 g/l), S (3.42 g/l), CN1 (3.90 g/l), CS1 (7.12 g/l).

Le ROI che presentano valori di N1RE e di N2RE medi più elevati sono quelle situate a ovest CS2, CN2 e S, che rispecchia ancora una situazione intermedia; mentre le ROI situate verso est, CS1 e CN1, sono caratterizzate da valori di N1RE e di N2RE medi inferiori.

Si può notare che, pur dando informazioni ridondanti tra loro, utilizzando come parametro di riferimento la media, N1RE e N2RE permettono di superare i dubbi e le incertezze incontrate con gli indici precedenti: i risultati ottenuti sono in totale accordo con il gradiente di salinità nelle acque sotterranee, ovvero il fattore di stress principale presente in pineta.

In conclusione le bande, che inserite nella combinazione lineare, caratteristica dell'indice NDVI, portano a informazioni differenti e non ridondanti sono la banda RED e la banda RED-EDGE; tali bande infatti sono localizzate su intervalli dello spettro elettromagnetico molto influenzate dalla condizione di stress della pianta e dal contenuto di clorofilla, come descritto nel Capitolo 2.

Al contrario il cambiamento della banda di riferimento del NIR non mostra la stessa influenza.

Di conseguenza si sceglie, per il proseguimento delle analisi, di concentrarsi sugli indici N1R-W e N1RE, tralasciando gli indici N2R e N2RE in quanto non contribuiscono a fornire ulteriori informazioni.

I criteri che hanno portato a tale scelta sono:

- l'utilizzo di indici dai quali si estraggono informazioni differenti e non ridondanti;
- la presenza nell'indice contenente la nuova banda del RED-EDGE di una banda di riferimento dalle caratteristiche note e già studiata in letteratura, NIR1;
- la possibilità di confronto, tramite l'utilizzo delle stesse bande nella combinazione dell'indice NDVI, con i risultati ottenuti dai dati a media risoluzione spaziale: N1R-W e N1R-A.

Si riportano in Fig.5.8 le mappe di N1R-W e N1RE con applicata una palette per una migliore visualizzazione delle differenti informazioni presenti nei due dati; essendo il range di dati nelle due immagini differenti le palette applicate associano gli stessi colori a intervalli di DN differenti.

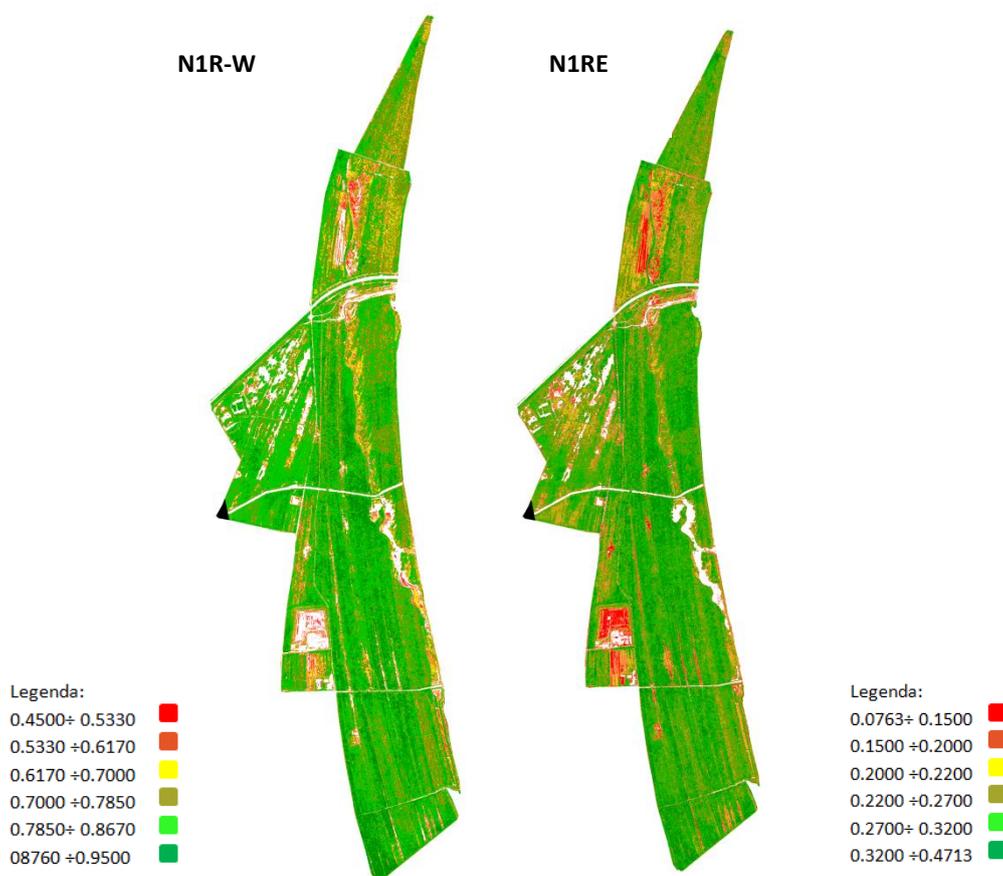


Fig.5.6 Mappe di N1R(sx) e N1RE(dx) con applicata la stessa palette di colori, ma associati a DN differenti

5.3.1 Correlazione tra nuovi NDVI e salinità

In Fig.5.7 si riportano le correlazioni, di tipo lineare, tra i valori medi di salinità e i valori medi degli indici N1R-W, N1RE, N2R, N2RE, per ciascuna ROI.

Osservando i coefficienti della retta di regressione lineare, Tab.5.15, si conferma come gli indici analizzati abbiano lo stesso comportamento a due a due: N1R e N2R, N1RE e N2RE. Si nota come per tutti gli indici considerati la correlazione con la salinità sia negativa.

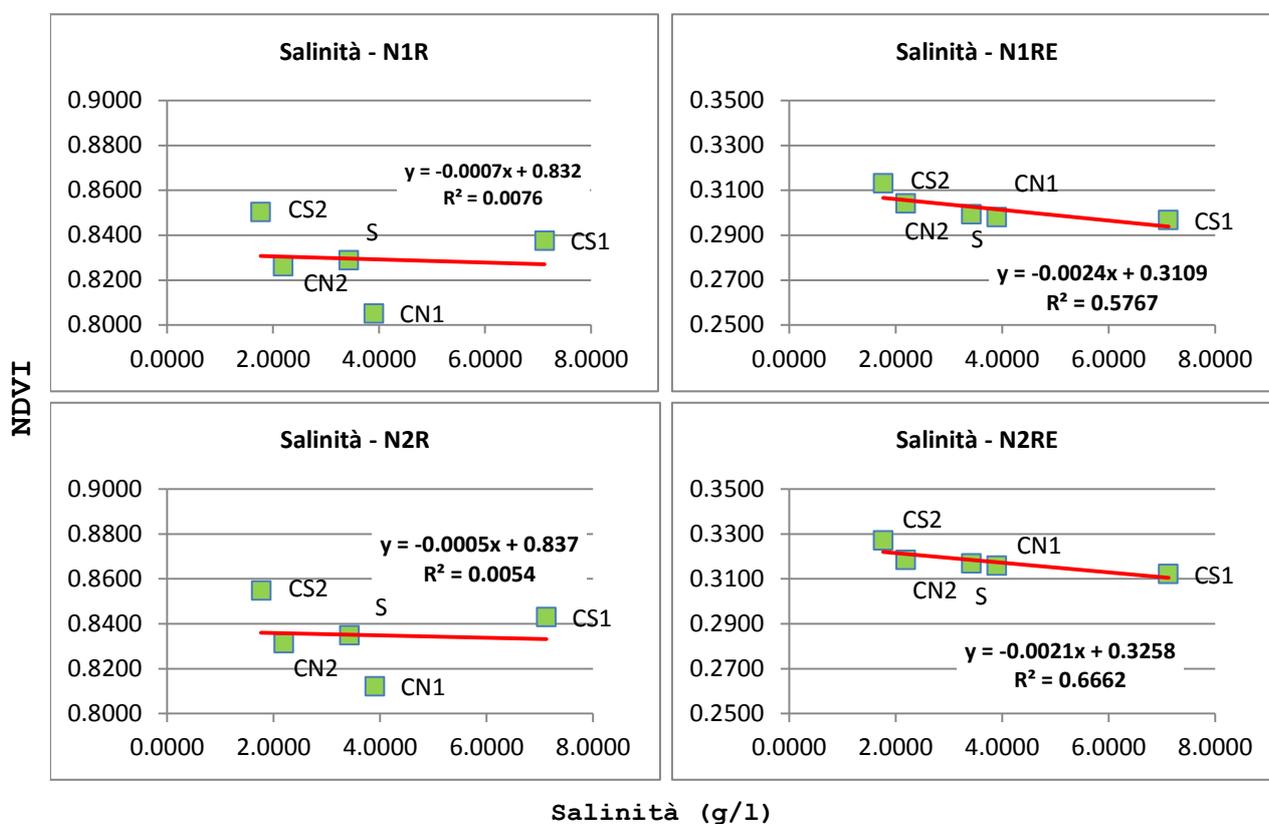


Fig.5.7 Correlazione tra la salinità e valori medi di N1R-W, N1RE, N2R, N2RE per ciascuna ROI.

Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: NDVI

DATO	RETTA	R^2
N1R-W	$y = -0.0007x + 0.8320$	0.0076
N1RE	$y = -0.0024x + 0.3109$	0.5767
N2R	$y = -0.0005x + 0.8370$	0.0054
N2RE	$y = -0.0021x + 0.3258$	0.6662

Tab.5.15 Retta di regressione lineare e R^2 per N1R-W, N1RE, N2R, N2RE

La correlazione tra valori di NDVI e salinità può essere svolta anche pixel per pixel, facendo coincidere i nodi del grid di salinità con i centri di ogni pixel dell'immagine.

Nello studio precedente (Barbarella et al.,2013) è stato provato che la correlazione pixel per pixel tra N1R e salinità non restituiva risultati utili.

In questa tesi è stata applicata la correlazione pixel per pixel all'indice N1RE per verificare se utilizzando la nuova banda RED-EDGE si possono ricavare risultati utili.

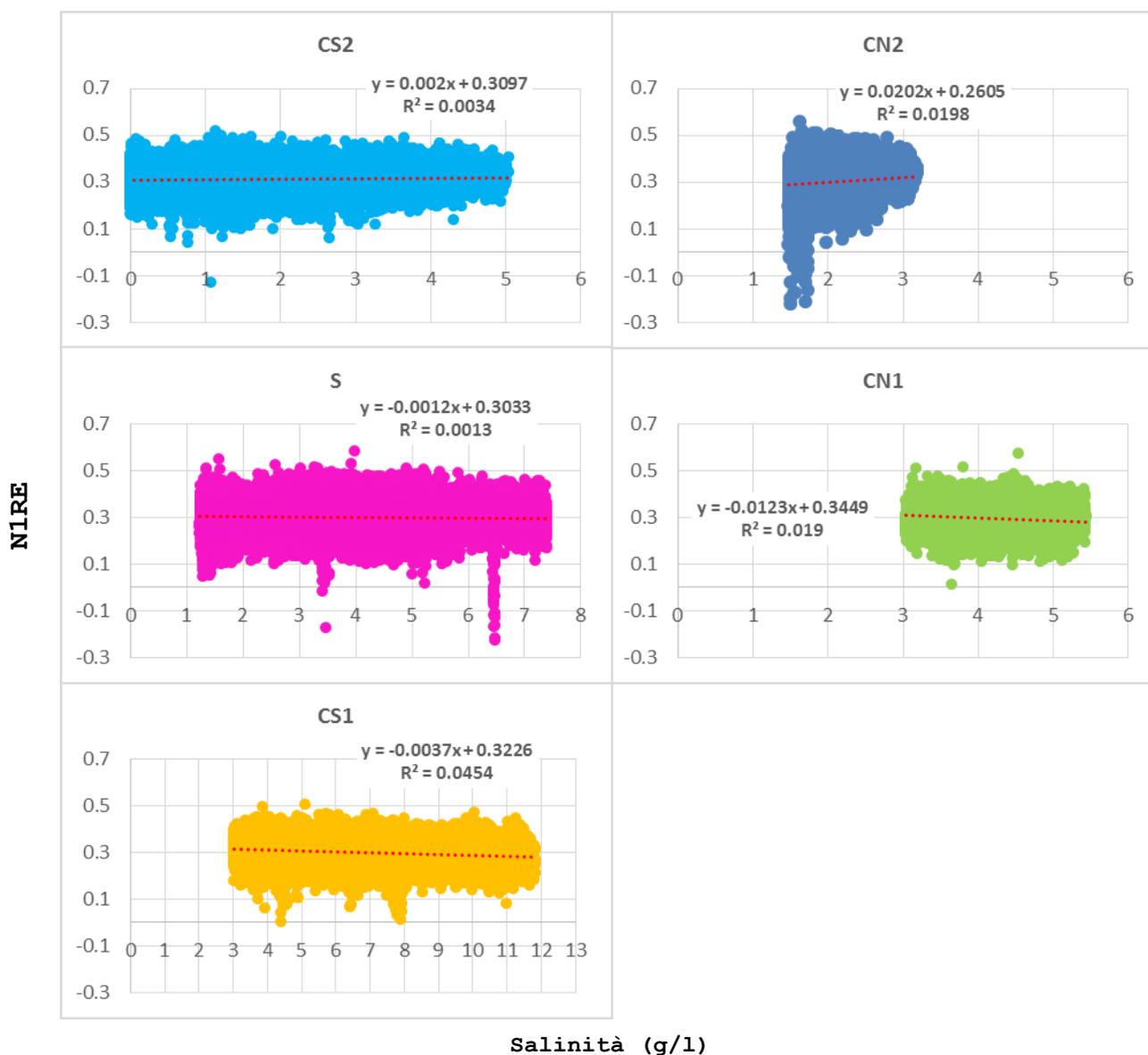


Fig.5.8 Correlazione pixel per pixel tra la salinità e valori medi di N1RE per ciascuna ROI.

Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1RE

Osservando le pendenze delle rette di regressione si nota che le ROI a ovest hanno coefficienti positivi (CS2:0.002, CN2:0.020), mentre le ROI a est mostrano una correlazione negativa (CN1:-0.012, CS1:-0.004); anche in questo caso S ha una situazione intermedia presentando il coefficiente più prossimo al valore nullo (-0.001). Di conseguenza si conferma la distinzione tra le ROI situate ad ovest e quelle a est.

5.4 Approfondimenti statistici

Per gli indici di NDVI ritenuti più rappresentativi della situazione, perché in grado di fornire informazioni non ridondanti, N1R-A (18/05/11), N1R-A(27/05/11), N1R-W e N1RE, si attua un'ulteriore e più raffinata analisi statistica dove vengono calcolati per ogni ROI relativa a ciascun indice:

- il valore di NDVI corrispondente al 5Percentile della ROI con valore di NDVI medio maggiore;
- la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI;
- i momenti del II ordine Skewness e Kurtosis.

Si ricorda che la scelta di utilizzare la frequenza relativa ha lo scopo di rendere confrontabili i grafici anche se appartenenti a differenti ROI e differenti dati satellitari. Si studiano i risultati ottenuti dall'analisi statistica di ciascuno indice e successivamente si procede al confronto.

➤ **N1R-A (18/05/11)**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
NDVI 5PERCENTILE				0.8086	
% PIXEL MINORI	0.568	0.396	0.245	0.05	0.314
SKEWNESS	-0.4843	-0.7798	-0.9755	-1.0006	-0.3753
KURTOSIS	-0.0972	0.8079	1.1297	1.9265	-0.2299

Tab.5.16 Statistiche relative al dato N1R-A(18/05/11). Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI.

La ROI con situazione migliore, considerando come parametro il valore di NDVI medio dell'indice, è CS2.

Osservando la Tab.5.16 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.8086 individuato sulla ROI CS2, siano elevate. Per CS1, seconda ROI in classifica, i pixel inferiori sono circa 1/4 del totale; per la situazione intermedia S la percentuale di questi pixel supera il 30%; per le ROI a nord della pineta CN2 e CN1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente del 40% e del 57%.

Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CS2 e CN1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.8086 di N1R-A sono rispettivamente il 5% e il 57%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta essere significativo e restituisce informazioni concordi e a completamento di quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, è la stessa ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.5.16, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. La ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CS2(-1.0006), seguita da CS1(-0.9755), proseguendo si trovano CN2(-0.7798) e CN1(-0.4843); la situazione più simmetrica si riscontra nella in S(-0.3478). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti inferiori o pari a 1 di conseguenza tutte le distribuzioni non si discostano eccessivamente dalla condizione di simmetria; si nota che la coda di CS2 è tale da distribuire pochi pixel su valori più

bassi di NDVI mentre quella di CN1, molto più corta, concentra molti pixel su quegli stessi valori.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.5.16, si sottolinea come per questo momento le distribuzioni non abbiano tutte lo stesso comportamento e siano difficilmente commentabili.

Le distribuzioni relative alle ROI CS2(1.9265), CS1(1.1297), CN2(0.8079) presentano valori positivi e sono classificate come distribuzioni leptocurtiche; l'andamento presenta maggiore allungamento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare del momento.

Al contrario le distribuzioni relative alle ROI S(-0.2299) e CN1(-0.0972) hanno valori negativi e vengono classificate come distribuzioni platicurtiche; l'andamento mostra un maggiore appiattimento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare in valore assoluto del momento, rispetto alla distribuzione normale.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.9.

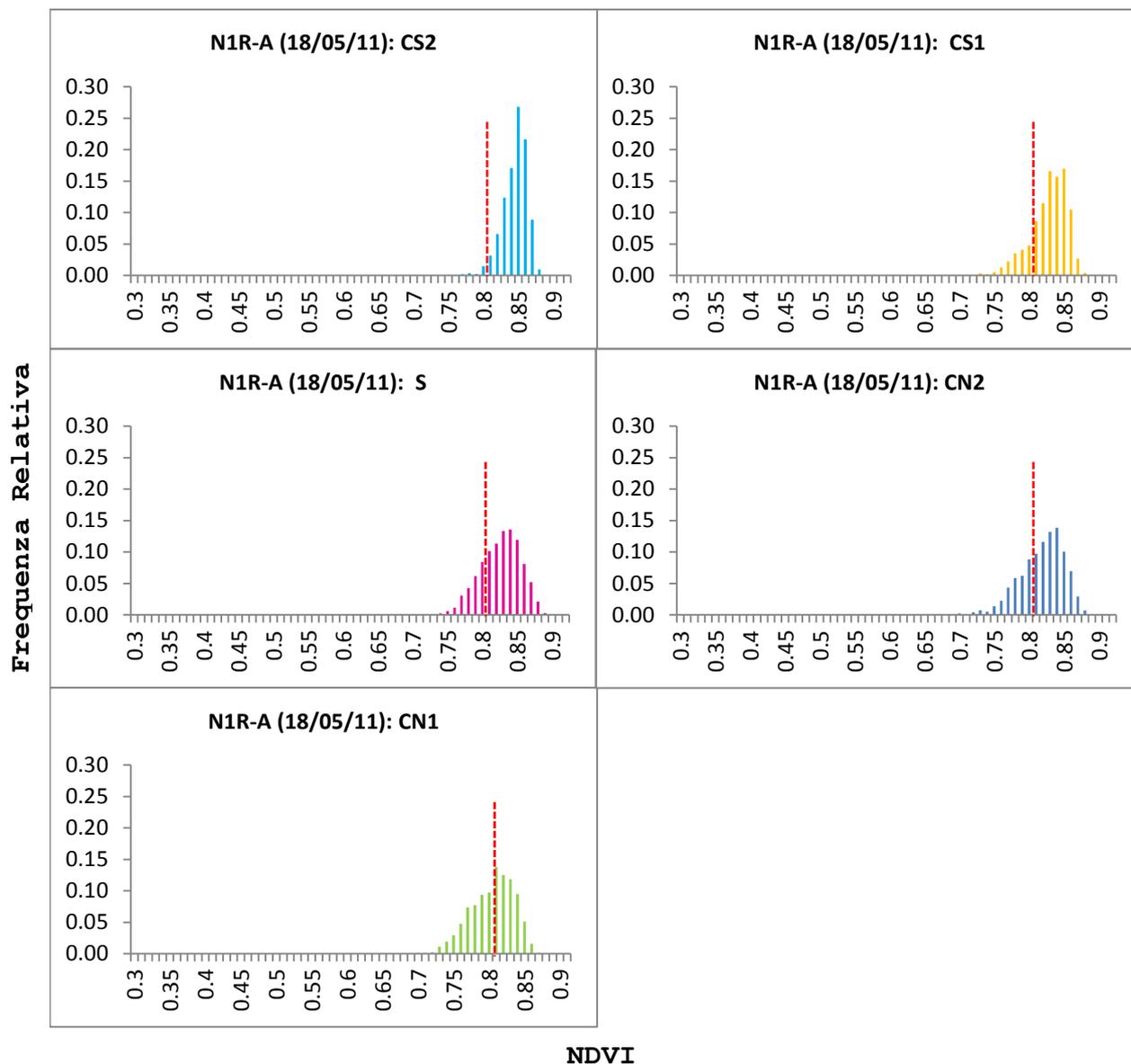


Fig.5.9 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI dell'indice N1R-A (18/05/11).
 Asse delle ascisse: NDVI; asse delle ordinate: Frequenza Relativa.
 La linea rossa corrisponde al 5Percentile

➤ **N1R-A (27/05/11)**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
NDVI 5 PERCENTILE				0.7063	
% PIXEL MINORI	0.571	0.414	0.246	0.05	0.286
SKEWNESS	-0.4998	-0.5970	-0.9439	-0.8952	-0.3478
KURTOSIS	0.5445	0.1933	0.6384	1.4584	-0.3458

Tab.5.17 Statistiche relative al dato N1R-A(27/05/11). Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI.

La ROI che presenta la situazione migliore, considerando come parametro il valore NDVI medio, è CS2. Osservando la Tab.5.17 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.7063 individuato sulla ROI CS2, siano elevate. Per CS1, seconda ROI in classifica per NDVI, i pixel inferiori sono circa 1/4 del totale; per la situazione intermedia S la percentuale di questi pixel si avvicina al 30%; per le ROI a nord della pineta CN2 e CN1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente di poco superiore al 40% e del 57%.

Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CS2 e CN1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.7063 di N1R-A sono rispettivamente il 5% e il 57%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta essere significativo e restituisce informazioni concordi e a completamento di quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, è la stessa ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.5.17, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. La ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CS1(-0.9439), seguita da CS2(-0.8952), proseguendo si trovano CN2(-0.5970) e CN1(-0.4998); la situazione più simmetrica si riscontra in S(-0.3478). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti inferiori a 1 di conseguenza tutte le distribuzioni non si discostano eccessivamente dalla condizione di simmetria; anche in questo caso la coda di CS2 è tale da distribuire pochi pixel su valori più bassi di

NDVI mentre quella di CN1, molto più corta, concentra molti pixel su quegli stessi valori.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.5.17, si sottolinea come per questo momento le distribuzioni non abbiano tutte lo stesso comportamento e siano difficilmente commentabili.

Le distribuzioni relative alle ROI CS2(1.4584), CS1(0.6384), CN1(0.5445), CN2(0.1933) presentano valori positivi e sono classificate come distribuzioni leptocurtiche; l'andamento presenta maggiore allungamento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare del momento.

Al contrario la distribuzione relativa alla ROI S(-0.3458) ha valore negativo e viene classificata come distribuzione platicurtica; l'andamento mostra un maggiore appiattimento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare in valore assoluto del momento, rispetto alla distribuzione normale.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.10.

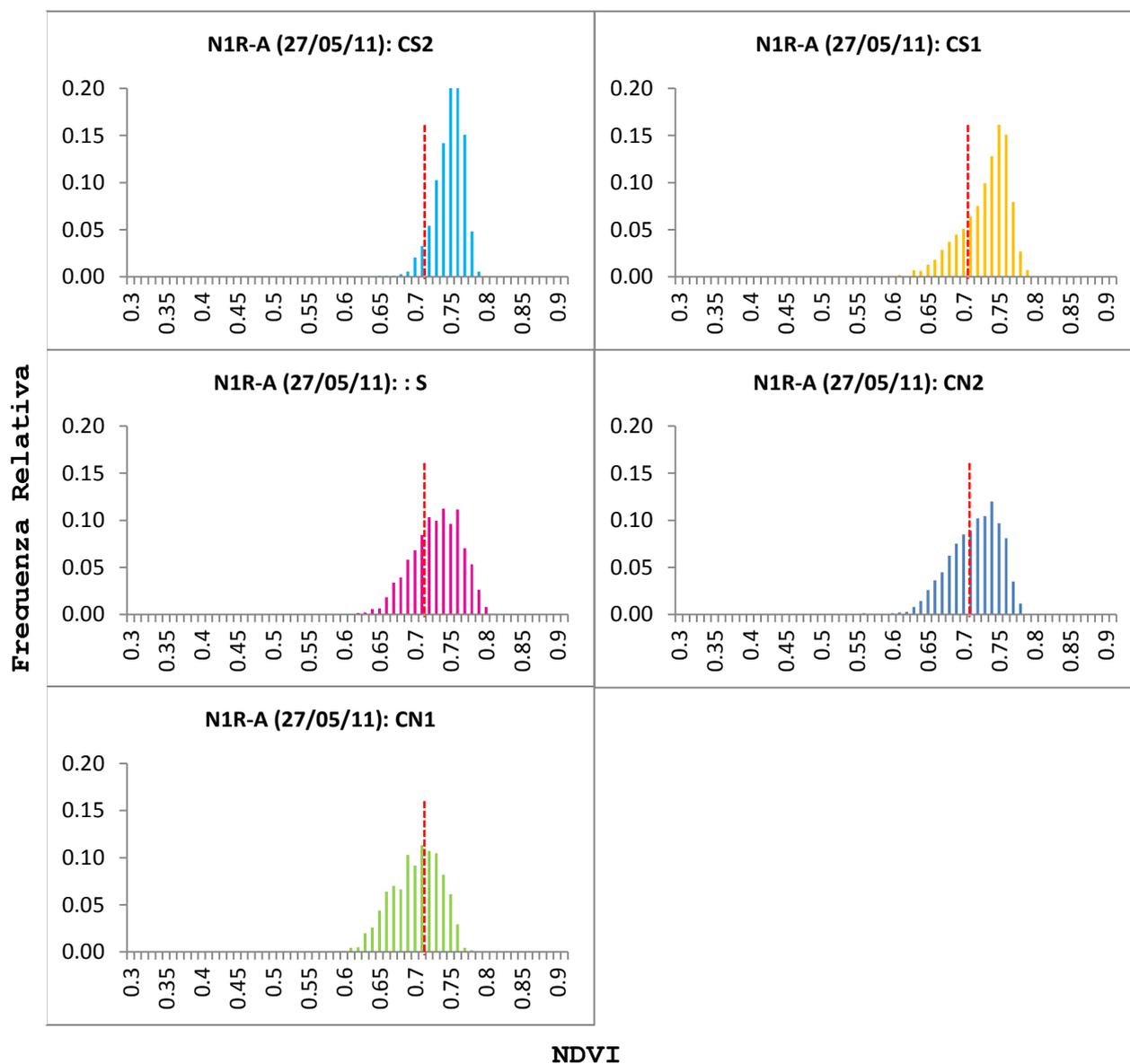


Fig.5.10 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI dell'indice N1R-A (27/05/11).
Asse delle ascisse: NDVI; asse delle ordinate: Frequenza Relativa.
La linea rossa corrisponde al 5Percentile

➤ **N1R-W**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
NDVI 5 PERCENTILE				0.773	
% PIXEL MINORI	0.311	0.19	0.12	0.049	0.142
SKEWNESS	-0.7007	-1.7373	-2.5728	-2.4012	-2.0892
KURTOSIS	0.5100	7.0255	14.8209	12.4484	12.2897

Tab.5.18 Statistiche relative al dato N1R-W. Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI.

La ROI con situazione migliore considerando come parametro il valore NDVI medio dell'indice, è CS2.

Osservando la Tab.5.18 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.773 individuato sulla ROI CS2, siano contenute. Per CS1, seconda ROI in classifica, i pixel inferiori sono il 12% del totale; per la situazione intermedia S la percentuale di questi pixel si avvicina al 15%; per le ROI a nord della pineta CN2 e CN1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente circa il 20% e di poco superiore al 30%.

Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CS2 e CN1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.773 di N1R-W sono rispettivamente il 5% e il 31%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta essere significativo per distinguere le due condizioni limite, meno per le situazioni intermedie, e restituisce informazioni concordi e a completamento di quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, è la stessa ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.5.18, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. Questo comportamento è mostrato anche dagli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.11. La ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CS1(-2.5728), seguita da CS2(-2.4012), proseguendo si trovano S(-2.0892), CN2(-1.7373) e CN1(-0.7007). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti, a eccezione di CN1,

superiori a 1.7 di conseguenza tutte le distribuzioni presentano una marcata asimmetria. Anche in questo caso la coda di CS2 è tale da distribuire pochi pixel su valori più bassi di NDVI mentre quella di CN1, molto più corta, concentra molti pixel su quegli stessi valori bassi; inoltre la differenza tra i valori dei momenti è molto più marcata.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.5.18, si sottolinea come per questo momento le distribuzioni abbiano tutte lo stesso comportamento presentando valori positivi: CS1(14.8209), CS2(12.4484), S(12.2897), CN2(7.0255), CN1(0.5100). Vengono classificate tutte come distribuzioni leptocurtiche e l'andamento presenta maggiore allungamento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare del valore.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.11.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa si nota, nelle ROI CN1 e CN2, la presenza di due picchi in corrispondenza degli intervalli $0.72 \div 0.78$ e $0.84 \div 0.9$ di NIR-W. Questa caratteristica sembra evidenziare la presenza di due vegetazioni distinte all'interno dell'area analizzata; è da sottolineare come entrambe le ROI siano a nord dove la densità dei Pini è maggiore. La distribuzione relativa alla ROI S presenta un comportamento simile con picco meno pronunciato tra $0.72 \div 0.78$, a questa area corrisponde una situazione intermedia per la densità delle piante di pino. Le ROI CS2 e CS1, nelle quali si trova bassa densità di pini, mostrano solamente un picco tra $0.84 \div 0.9$; queste distribuzioni hanno momenti del II ordine Skewness maggiori, e presentano una coda più pronunciata a sinistra verso valori di 0.72. Avendo il dato a maggior risoluzione spaziale, rispetto ad Aster, risulta essere più sensibile sia alla presenza di piante di pino, sia alla distribuzione delle paleodune all'interno delle ROI.

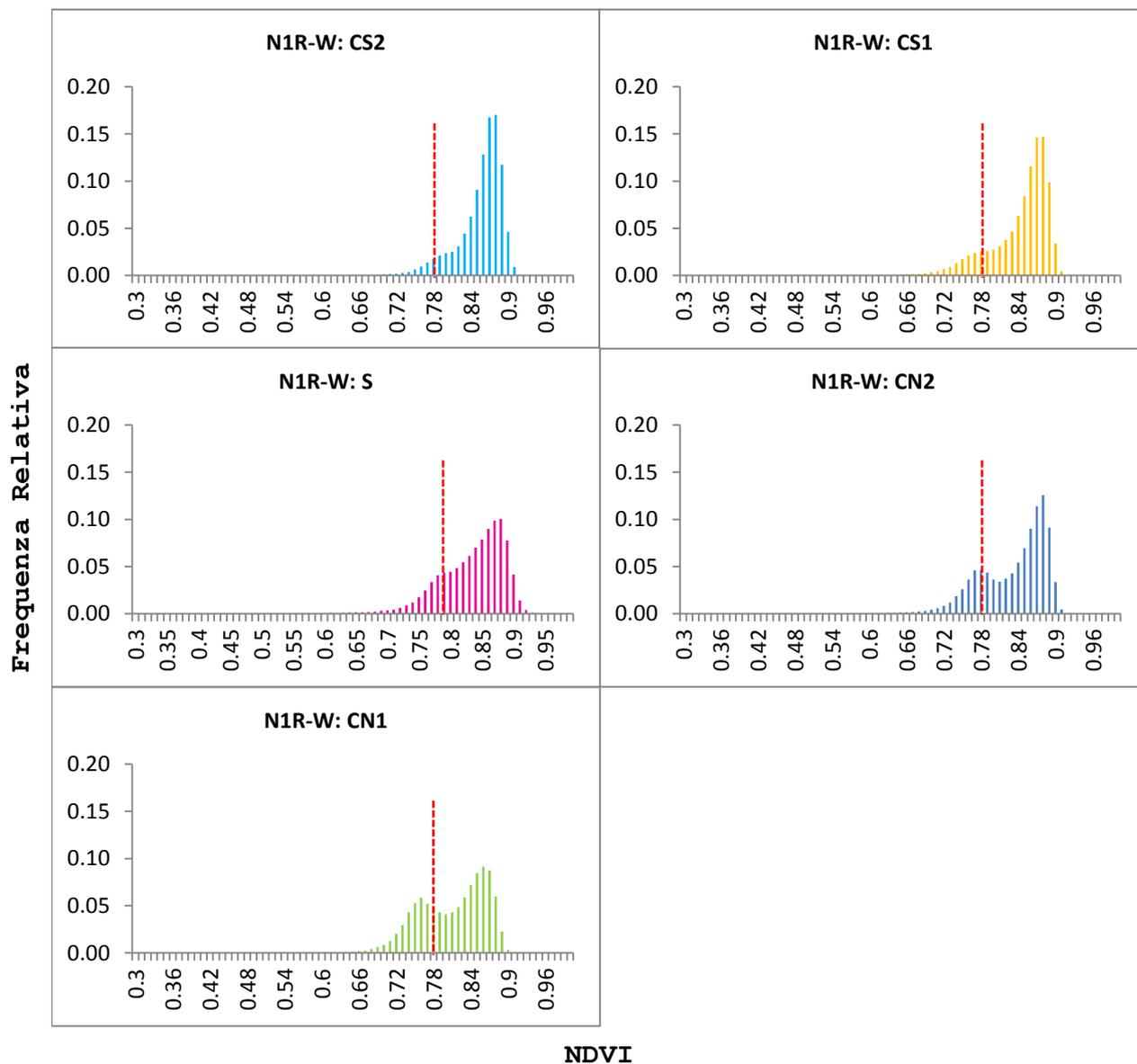


Fig.5.11 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI dell'indice N1R-W.
Asse delle ascisse: NDVI; asse delle ordinate: Frequenza Relativa.
La linea rossa corrisponde al 5Percentile

➤ **N1RE**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
N1RE 5 PERCENTILE				0.2454	
% PIXEL MINORI	0.092	0.101	0.124	0.049	0.129
SKEWNESS	-0.0462	-0.4005	-0.2485	-0.1707	-0.1125
KURTOSIS	-0.0007	2.1044	0.4309	0.4835	1.2265

Tab.5.19 Statistiche relative al dato N1RE. Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di NDVI corrispondente al 5Percentile per le rimanenti ROI.

La ROI che presenta la situazione migliore corrispondente a N1RE, considerando come parametro il valore NDVI medio, è ancora una volta CS2.

Osservando la Tab.5.19 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.2454 individuato sulla ROI CS2, siano molto contenute. Per CN2, seconda ROI in classifica, i pixel inferiori sono appena superiori al 10% del totale; per la situazione intermedia S la percentuale di questi pixel si avvicina al 13%; per le ROI a est della pineta CN1 e CS1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente il 9% e di poco superiore al 12%.

Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CS2 e CS1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.2454 di N1RE sono rispettivamente il 5% e il 12%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta non essere significativo, inoltre restituisce informazioni discordanti da quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, non rispecchia quella ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.5.19, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. La ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CN2(-0.4005), seguita da CS1(-0.2485), proseguendo si trovano CS2(-0.1707) e S(-0.1125); la situazione più simmetrica si riscontra in CN1(-0.0462). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti inferiori

a 0.5 di conseguenza tutte le distribuzioni si avvicinano molto alla condizione di simmetria.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.5.19, si sottolinea come per questo momento le distribuzioni non abbiano tutte lo stesso comportamento.

Le distribuzioni relative alle ROI CS2(0.4835), CS1(0.4309), S(1.2265), CN2(2.1044) presentano valori positivi e sono classificate come distribuzioni leptocurtiche; l'andamento presenta maggiore allungamento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare del momento.

Al contrario la distribuzione relativa alla ROI CN1(-0.0007) ha valore negativo e viene classificata come distribuzione platicurtica; l'andamento mostra un maggiore appiattimento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare in valore assoluto del momento, rispetto alla distribuzione normale.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.5.12.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa si nota come tutte gli andamenti si avvicinano a una distribuzione normale, di conseguenza risultano essere poco significativi. La variabilità casuale dei valori dell'indice può essere dovuta all'utilizzo della banda RED-EDGE molto sensibile alla variabilità della vegetazione, anche all'interno della stessa classe TDF(Thermophilic Deciduous Forest). Infatti per questa tipologia di vegetazione sono stati riscontrati valori di RED-EDGE in un intervallo di DN con valori minimi inferiori a 450 e massimi superiori a 3680.

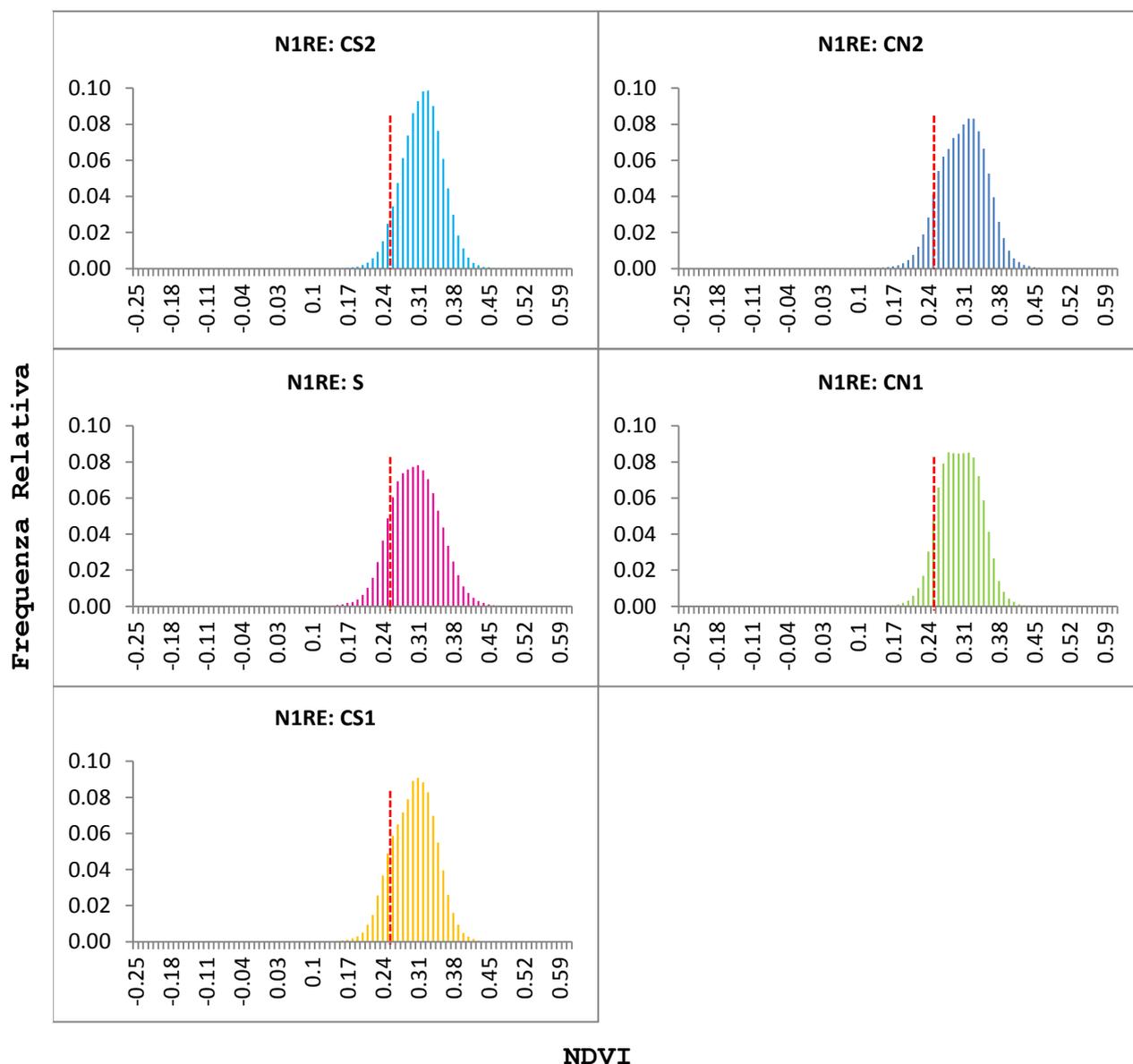


Fig.5.12 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna ROI dell'indice N1RE.
 Asse delle ascisse: NDVI; asse delle ordinate: Frequenza Relativa.
 La linea rossa corrisponde al 5Percentile

Di conseguenza si afferma che i risultati ottenuti, applicando il 5percentile e i momenti di II ordine Skewness e Kurtosis all'indice N1RE dell'immagine ad alta risoluzione, non contribuiscono a fornire informazioni utili riguardo la situazione delle aree interne alla pineta. Tali risultati portano a concludere che l'indice analizzato è fortemente influenzato dalla variabilità della vegetazione e questa caratteristica è dovuta sia alla sensibilità della banda RED-EDGE, sia all'alta risoluzione geometrica del sensore.

Confrontando gli indici che sfruttano la banda del RED, sia in Aster, sia in WV-2, è possibile valutare l'importanza dell'alta risoluzione.

Utilizzando i dati provenienti dal sensore WV-2 è possibile individuare, nella distribuzione degli istogrammi di frequenza relativa, la presenza di due specie distinte all'interno della pineta: TDF(Thermophilic Deciduous Forest) e il Pinus Pinea (pino domestico). Infatti nelle ROI in cui la presenza dei pini è maggiore, CN1 e CN2, si evidenzia la presenza di due picchi nella distribuzione relativi agli intervalli $0.72 \div 0.78$ e $0.84 \div 0.9$ di N1R-W ; con il diminuire della densità dei pini il picco relativo all'intervallo $0.72 \div 0.78$ si abbassa, ROI S, fino a scomparire in CS1 e CS2 in cui la presenza di piante di Pinus Pinea è la minima.

La distinzione dei picchi non è evidenziata dai i dati ottenuti con la media risoluzione N1R-A a causa della maggior varietà di piante all'interno del singolo pixel; inoltre tali indici, N1R-A(18/05/11) e N1R-A(27/05/11), restituiscono gli stessi risultati e informazioni ridondanti tra di loro, anche se schiftati.

Concludendo per entrambi gli indici N1R, con questa ulteriore analisi statistica, vengono confermati i risultati ricavati con quella di base oltre ad ottenere ulteriori informazioni che permettono di aumentare la conoscenza della situazione studiata.

Al contrario, l'ulteriore analisi svolta sull'indice N1RE non porta a informazioni rilevanti; evidenzia solamente l'alta influenza della variabilità della vegetazione interna alle ROI sull'indice stesso.

6 ULTERIORI ELABORAZIONI NEL DATO WORLDVIEW-2

6.1 Metodologia

L'alta risoluzione spaziale del dato WV-2 consente la discriminazione di maggiori dettagli rispetto alle immagini Aster, permettendo anche l'individuazione e il riconoscimento di alcuni tipi di alberi all'interno della pineta.

Sfruttando questa potenzialità dell'immagine e l'acquisizione da parte del sensore nelle bande BLUE, GREEN, RED, RED-EDGE e NIR1, si è scelto di approfondire lo studio delle singole ROI riportate nei precedenti capitoli.

Come descritto nel Capitolo 2 relativamente al dato WV-2, con la combinazione RGB delle bande NIR1, RED-EDGE, RED, è possibile discriminare classi diverse all'interno della vegetazione, perché vengono utilizzate lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico in cui, a causa della clorofilla, l'energia passa da essere assorbita all'essere riflessa. Si ricorda che con questa visualizzazione le conifere vengono mostrate in tonalità tra il marrone e il verde, le zone erbose e coltivate tendono invece a tonalità tra il giallo e l'arancione, mentre il suolo nudo e la roccia appaiono in grigio.

Anche la combinazione a falsi colori modificata NIR1, GREEN, BLUE, rispettivamente nei canali R, G e B, consente di distinguere le conifere, le caducifoglie e l'erba con una variazione di tonalità più ampia rispetto alla combinazione a falsi colori standard.

In questo caso le conifere appaiono con tonalità di rosso scuro, le caducifoglie in tonalità di rosso più luminose, mentre le aree erbose con tonalità tra il rosso e l'arancione.

L'utilizzo di entrambe le combinazioni permette una valutazione più raffinata della copertura vegetale.

Partendo infatti dal dato sottoposto a preprocessing, ovvero correzione atmosferica e resize, si sono create delle SUB-ROI appartenenti a due classi distinte della vegetazione all'interno di ogni ROI, la classe PINO e la classe NON PINO.

Sono state discriminate queste due classi per i seguenti motivi:

- le piante di pino rappresentano un fattore di stress all'interno della pineta, in quanto la loro condizione di piante alloctone ne compromette lo stato di salute a prescindere dall'intrusione di acqua salata nell'acquifero;
- le piante di pino sono distinguibili in fase di visualizzazione utilizzando le combinazioni descritte precedentemente e grazie alla dimensione e altezza della loro chioma, sono più alti delle piante circostanti;
- le specie che costituiscono la vegetazione TDF (Thermophilic Deciduous Forest) non sono ulteriormente distinguibili senza un rilievo in sito all'interno della pineta.

Essendo le SUB-ROI delle Regioni di interesse, si segue per la loro realizzazione in ENVI la procedura descritta nel Capitolo 4.

Anche le SUB-ROI vengono create come poligoni, ma in questo caso, a differenza delle ROI, si sfrutta la funzione di ENVI Multi-Part che consente di realizzare un'unica regione di interesse attraverso la selezione di più zone nell'immagine. Con il termine SUB-ROI quindi si indicherà l'insieme dei poligoni interni alla ROI corrispondenti a una determinata classe: SUB-ROI PINO e SUB-ROI NON PINO.

L'operazione di editing delle SUB-ROI è avvenuta sull'immagine relativa alla combinazione NIR1, RED-EDGE, RED; in questa immagine, all'interno di ogni ROI, vengono identificate aree omogenee in relazione alla classe considerata e successivamente assegnate alla SUB-ROI corrispondente.

In relazione a ciascuna classe, le SUB-ROI, appartenenti alle differenti ROI, sono realizzate seguendo un criterio di omogeneità qualitativo e quantitativo. Si cerca cioè di attribuire, alle SUB-ROI NON PINO, pixel appartenenti alla stessa tipologia di vegetazione e in numero confrontabile con le altre, lo stesso si fa per SUB-ROI PINO. La confrontabilità delle SUB-ROI NON PINO dal punto di vista qualitativo è complessa a causa della varietà e disomogeneità della vegetazione TDF; più semplice risulta invece per le SUB-ROI PINO.

L'immagine ottenuta dalla combinazione NIR1, GREEN, BLUE, viene utilizzata per la validazione e la correzione delle SUB-ROI create.

Si riportano a esempio degli zoom delle SUB-ROI PINO e NON PINO per ciascuna ROI (Fig.6.1, Fig.6.2, Fig.6.3, Fig.6.4, Fig.6.5).

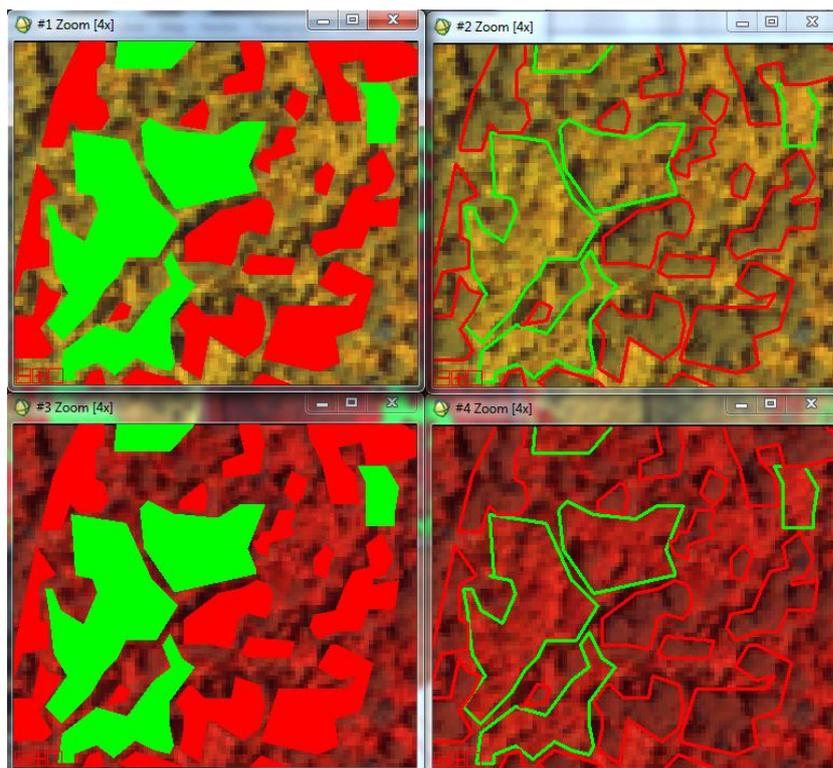


Fig.6.1 Zoom di alcune SUB-ROI(sx) nell'area CN1 e i rispettivi elementi vettoriali (dx) applicati alle combinazioni NIR1,RED-EDGE-RED (sopra) e NIR1,GREEN,BLUE (sotto). SUB-ROI NON PINO in verde; SUB-ROI PINO in rosso

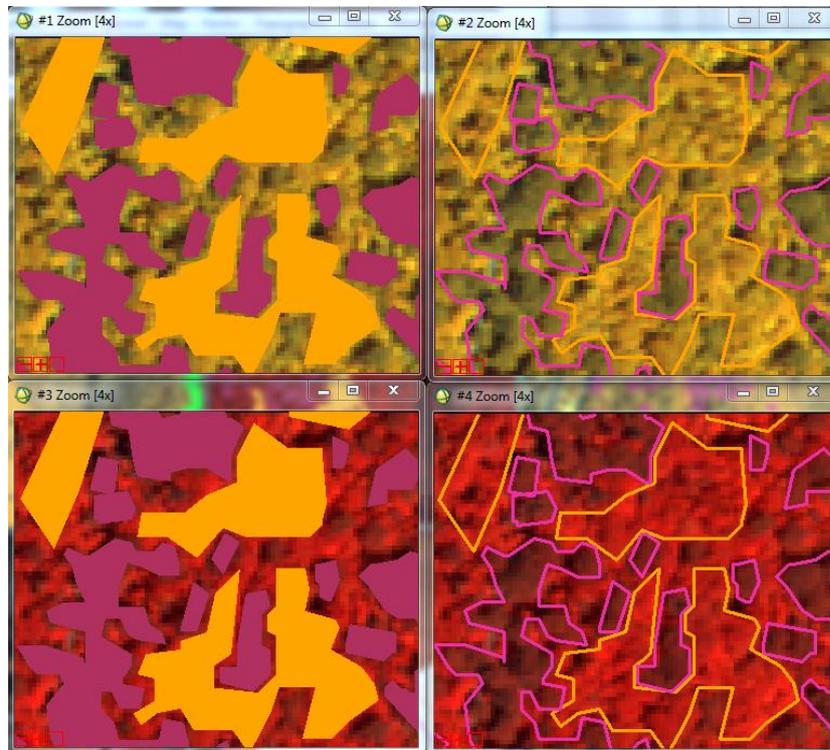


Fig.6.2 Zoom di alcune SUB-ROI(sx) nell'area CN2 e i rispettivi elementi vettoriali (dx) applicati alle combinazioni NIR1,RED-EDGE-RED (sopra) e NIR1,GREEN,BLUE (sotto). SUB-ROI NON PINO in arancione; SUB-ROI PINO in fucsia

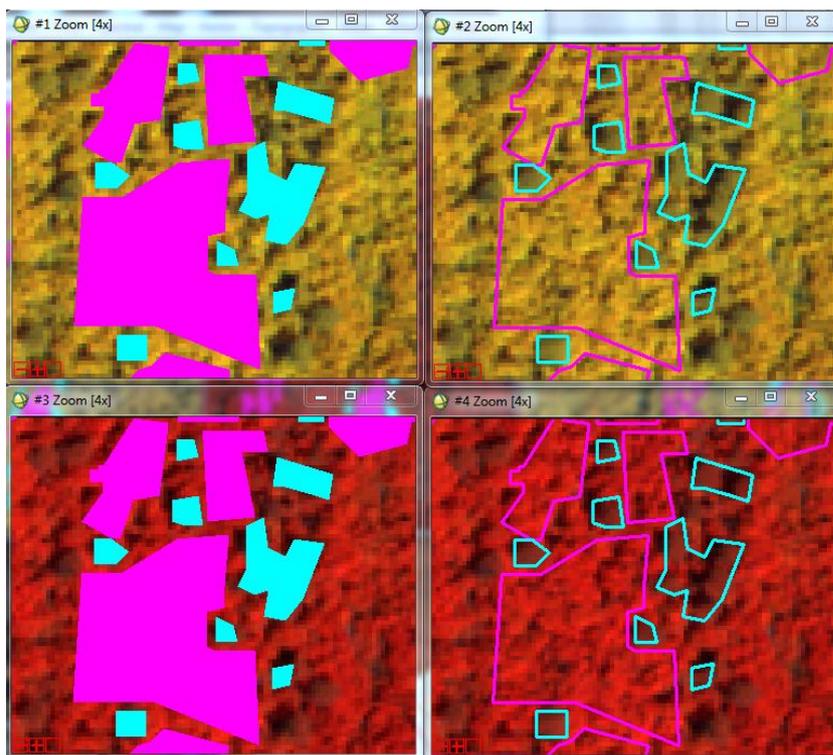


Fig.6.4 Zoom di alcune SUB-ROI(sx) nell'area CS1 e i rispettivi elementi vettoriali (dx) applicati alle combinazioni NIR1,RED-EDGE-RED (sopra) e NIR1,GREEN,BLUE (sotto). SUB-ROI NON PINO in magenta; SUB-ROI PINO in azzurro

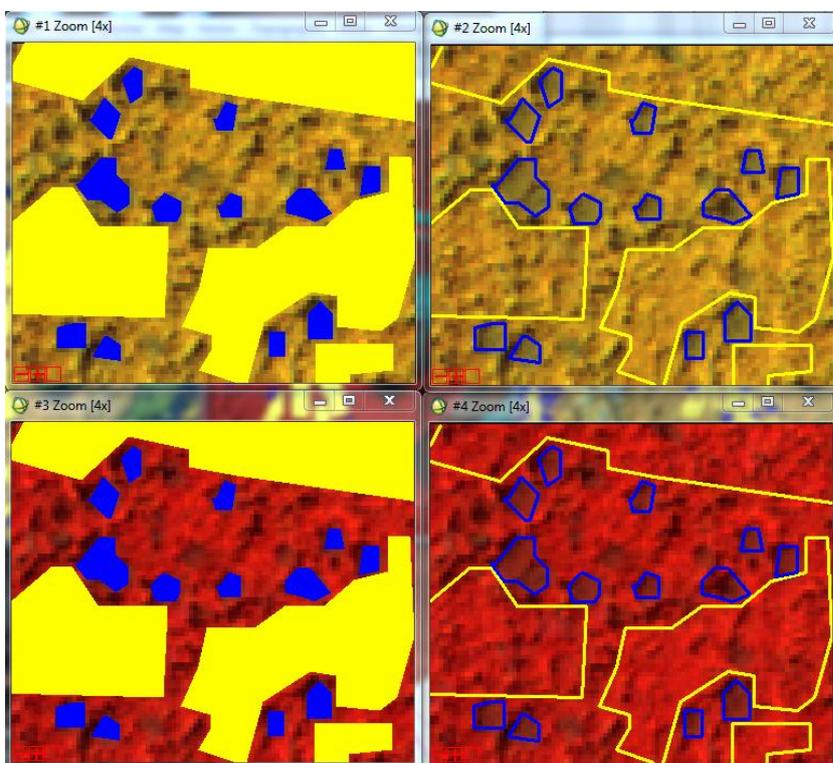


Fig.6.3 Zoom di alcune SUB-ROI(sx) nell'area CS2 e i rispettivi elementi vettoriali (dx) applicati alle combinazioni NIR1,RED-EDGE-RED (sopra) e NIR1,GREEN,BLUE (sotto). SUB-ROI NON PINO in giallo; SUB-ROI PINO in blu

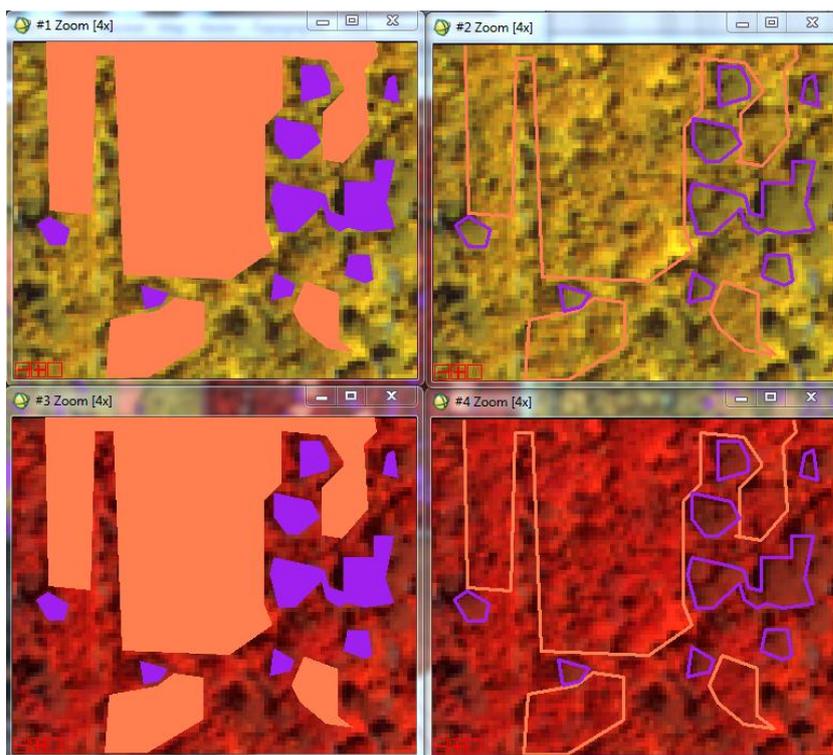


Fig6.5 Zoom di alcune SUB-ROI (sx) nell'area S e i rispettivi elementi vettoriali (dx) applicati alle combinazioni NIR1,RED-EDGE-RED (sopra) e NIR1,GREEN,BLUE(sotto). SUB-ROI NON PINO in corallo; SUB-ROI PINO in viola

Con gli esempi riportati si evidenzia la difficoltà di ottenere SUB-ROI NON PINO con vegetazione TDF omogenea in tutte le ROI; la tipologia della vegetazione selezionata all'interno delle SUB-ROI avrà ripercussioni sui risultati della successiva analisi statistica.

Le SUB-ROI vengono sovrapposte alle mappe degli indici della vegetazione N1R-W e N1RE create in precedenza.

Si ricorda che l'espressione utilizzata per descrivere l'indice della vegetazione NDVI è la seguente:

$$(\text{float}(b1-b2)/\text{float}(b1+b2))$$

dove b1 e b2 sono le due bande scelte.

Per gli indici N1R-W e N1RE applicati al dato WV-2 le combinazioni di bande sono rispettivamente:

- b1= NIR1 , b2= RED;
- b1= NIR1 , b2= RED-EDGE.

Operando con ROI più dettagliate per l'elaborazione delle SUB-ROI si considera anche l'indice DATT, specifico per il contenuto di clorofilla e descritto nel Capitolo 1.

L'espressione che descrive l'indice della vegetazione DATT e con la quale è stata realizzata la rispettiva mappa è la seguente:

$$(\text{float}(b1-b2)/\text{float}(b1-b3))$$

dove $b1=NIR1$, $b2=RED-EDGE$, $b3=RED$.

Si sono estratti i valori interni alle SUB-ROI sovrapposte alle mappe dei tre indici considerati, come descritto nel Capitolo 4, realizzando due distinti file.txt per le SOTTORI PINO e NON PINO per ciascuna ROI. Come per le ROI, i file.txt contengono: Point (ID del pixel), Map Location (coordinate cartografiche E, N del pixel) e Band Values (valore del DN dell'indice utilizzato per quell'immagine).

Le elaborazioni statistiche sono realizzate all'interno di un foglio di calcolo partendo dall'importazione di ogni file.txt creato; per ognuna delle tre mappe viene realizzato uno specifico foglio.

Gli elementi calcolati sono gli stessi per tutte le SUB-ROI e gli indici applicati.

I parametri, relativi all'analisi statistica iniziale, calcolati per ciascuna SUB-ROI sono:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard;
- Istogramma di frequenza relativa.

Si utilizza la frequenza relativa con lo scopo di rendere confrontabili gli istogrammi di ciascuna SUB-ROI anche se appartenenti a differenti aree campione.

Per ogni mappa viene calcolato:

- Valore minimo assoluto;
- Valore massimo assoluto.

Concentrandosi solo sulle SOTTORI NON PINO, in quanto la presenza del pino è considerata un fattore di stress, per ciascun indice si attua l'ulteriore analisi statistica, già sperimentata sulle ROI. In questa analisi vengono calcolati per le SUB-ROI relative a ogni area campione:

- Il valore di NDVI corrispondente al 5Percentile della SUB-ROI con valore medio maggiore;

- La percentuale di pixel al di sotto del valore dell'indice corrispondente al 5Percentile per le rimanenti SUB-ROI;
- I momenti del II ordine Skewness e Kurtosis.

6.2 Indice NDVI: N1R-W

I dati di N1R-W relativi a ciascuna SUB-ROI, esportati in un file.txt contenente per ogni nodo estratto le coordinate cartografiche E,N oltre al valore di NDVI, vengono sottoposti ad analisi statistica per studiare la condizione di stress all'interno della pineta in funzione del comportamento di riflettanza della vegetazione.

Nella tabella seguente, Tab.6.1, si riportano i risultati ottenuti relativi a entrambe le classi di vegetazione considerate:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	NON PINO				PINO			
	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.
CN1	0.4844	0.9148	0.8497	0.029	0.4523	0.8834	0.7510	0.037
CN2	0.6749	0.9168	0.8701	0.020	0.4348	0.8991	0.7658	0.041
CS1	0.5783	0.9174	0.8657	0.024	0.3629	0.8991	0.7640	0.047
CS2	0.6726	0.9229	0.8709	0.021	0.4291	0.9067	0.7807	0.039
S	0.6228	0.9818	0.8708	0.025	0.5076	0.9192	0.7766	0.036

Tab.6.1 Valori minimi, valori massimi, valori medi e deviazioni standard di N1R-W per ciascuna SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

In rosso sono evidenziate le situazioni peggiori, corrispondenti ai valori NDVI medi minori, mentre in verde quelle migliori, valori medi maggiori.

Osservando la Tab.6.1 si nota come i valori medi delle SUB-ROI NON PINO siano più elevati dei corrispondenti valori delle SUB-ROI PINO; questo testimonia, tenendo in considerazione la differente tipologia di vegetazione e di apparato fogliare, come le piante di pino siano in condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione all'interno della pineta.

Infatti nell'area migliore per entrambe le classi (CS2) il valore N1R-W medio è pari a 0.8709 per la SUB-ROI NON PINO e 0.7807 per la SUB-ROI PINO; la stessa situazione si verifica nell'area peggiore per entrambe le classi (CN1), dove il valore medio risulta 0.8497 per la SUB-ROI NON PINO e 0.7510 per la SUB-ROI PINO.

Si nota come i valori medi delle SUB-ROI NON PINO e PINO ricadano negli intervalli di N1R-W, $0.72 \div 0.78$ e $0.84 \div 0.9$, in cui si sono riscontrati, negli istogrammi di frequenza relativa delle ROI (Fig.5.11), i due picchi che si è supposto evidenziare la presenza di due vegetazioni distinte all'interno dell'area analizzata.

Di conseguenza si può affermare che la presenza di pini nelle ROI porta ad un abbassamento del valore medio dell'indice, proporzionale alla densità di tali piante. Si conferma quindi che il pino è da considerarsi un fattore di stress nell'analisi della situazione interna alla pineta; la creazione di SUB-ROI NON PINO permette di studiare la condizione della vegetazione di San Vitale eliminando questo fattore di stress. Queste considerazioni vengono confermate dall'andamento degli istogrammi di frequenza relativa per le SUB-ROI NON PINO e PINO in Fig.6.6, nei quali si notano visivamente i due picchi, negli intervalli di valori $0.72 \div 0.78$ e $0.84 \div 0.9$ di N1R-W, distinti in funzione della classe di vegetazione.

Le deviazioni standard rispetto al valore medio risultano essere contenute per l'indice studiato, minori di 0.05, di conseguenza la media si assume rappresentativa della situazione interna alle SUB-ROI per entrambe le classi.

Basandosi sui valori medi si definiscono le classifiche tra le SUB-ROI NON PINO e le SUB-ROI PINO entrambe dalla migliore alla peggiore, ricordando che valori maggiori dell'indice coincidono a condizioni di minore stress della vegetazione.

Le classifiche ottenute vengono confrontate con quella della salinità e dell'indice N1R-W applicato alle ROI ottenute nel Capitolo 5 (Tab.6.2).

	Salinità	ROI	NON PINO	PINO	
1°	CS2	CS2	CS2	CS2	 <p>Salinità crescente NDVI decrescente</p>
2°	CN2	CS1	S	S	
3°	S	S	CN2	CN2	
4°	CN1	CN2	CS1	CS1	
5°	CS1	CN1	CN1	CN1	

Tab.6.2 Confronto classifiche ottenute con i valori medi, dalla situazione migliore alla peggiore, della salinità e dell'indice N1R-W per le ROI, SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO

Confrontando le classifiche ottenute, Tab.6.2, si può notare che il passaggio dalle ROI alla SUB-ROI NON PINO, sposta CS1 dalla seconda alla penultima posizione.

Questa variazione porta al superamento delle incertezze e dei dubbi incontrati con l'utilizzo dell'indice N1R-W applicato alle ROI; infatti la classifica NON PINO risulta essere maggiormente concorde con quella stilata utilizzando come parametro la salinità.

Applicando le SUB-ROI NON PINO si mantiene la distinzione tra le SUB-ROI ad ovest nella pineta, che si trovano ai primi tre posti della classifica, CS2 (0.8709), S(0.8708) e CN2(0.8701), rispetto a quelle situate ad est che occupano il penultimo e l'ultimo posto, CS1(0.8657) e CN1(0.8497).

Di conseguenza i valori medi dell'indice N1R-W ricavati dalle SUB-ROI NON PINO rispecchiano l'andamento del gradiente di salinità interno alla pineta. Ricordando la complessità nell'ottenere SUB-ROI NON PINO con vegetazione omogenea per tutte le aree e avendo considerato solamente alcune zone interne alle ROI, come spiegato nel paragrafo precedente, si considerano le medie delle SUB-ROI solamente attendibili per la distinzione tra le SUB-ROI NON PINO a est da quelle a ovest.

Questa distinzione si riscontra anche nella classifica basata sulle SUB-ROI PINO.

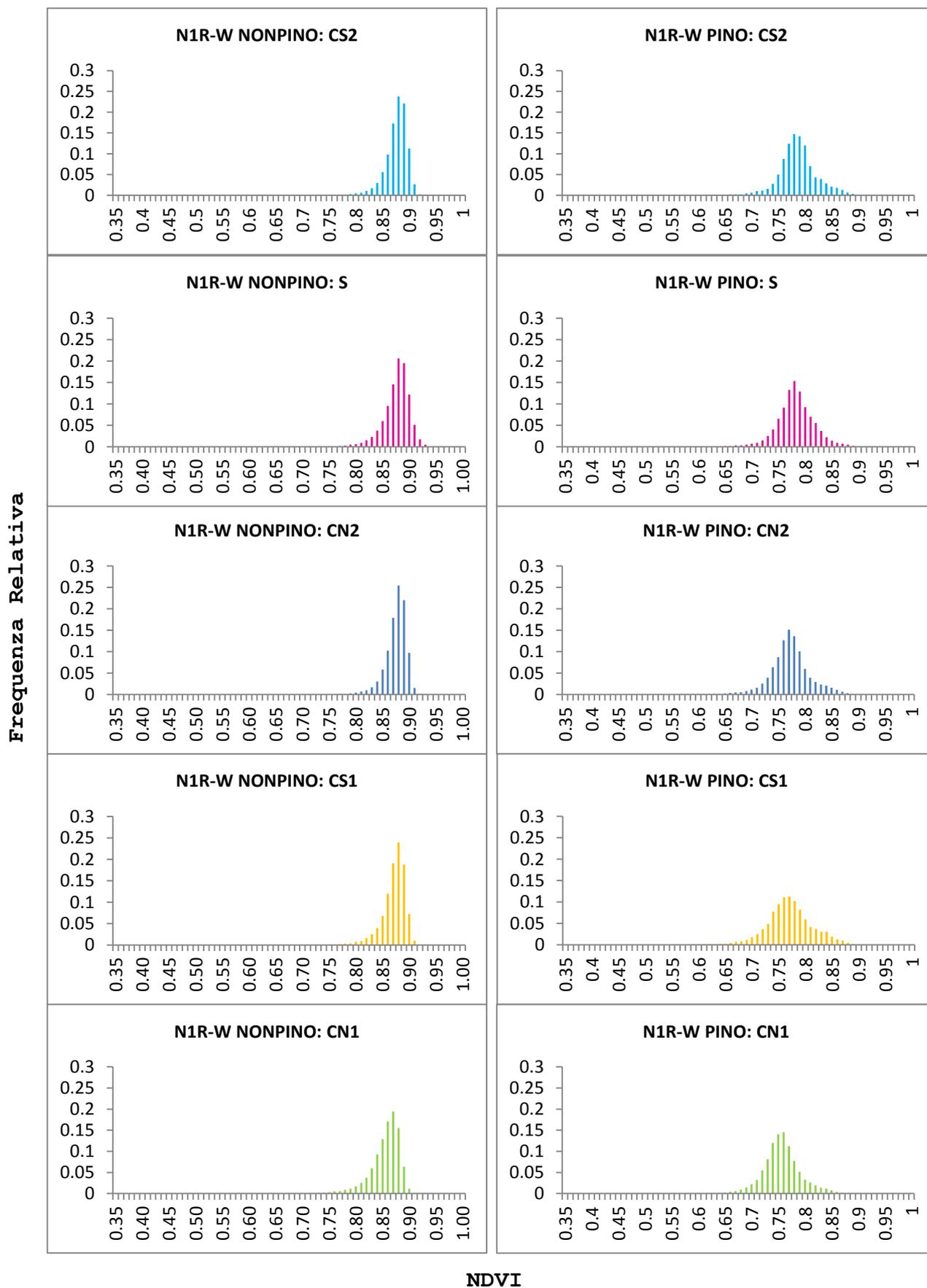


Fig.6.6 Istogrammi di frequenza relativa di N1R-W per ciascuna SUB-ROI NON PINO(sx) e PINO(dx) .
 Asse delle ascisse: N1R-W asse delle ordinate: Frequenza Relativa

6.2.1 Correlazione tra NDVI e salinità per le SUB-ROI NON PINO

Escludendo le piante di pino, attraverso la creazione delle SUB-ROI NON PINO, si considera come unico fattore di stress l'intrusione di acqua salata nell'acquifero. Di conseguenza si valuta la correlazione, di tipo lineare, tra i valori medi di salinità e di N1R-W delle SUB-ROI NON PINO. Dalla pendenza della retta di regressione (-0.0012) si conferma negativa la correlazione tra salinità e l'indice N1R-W.

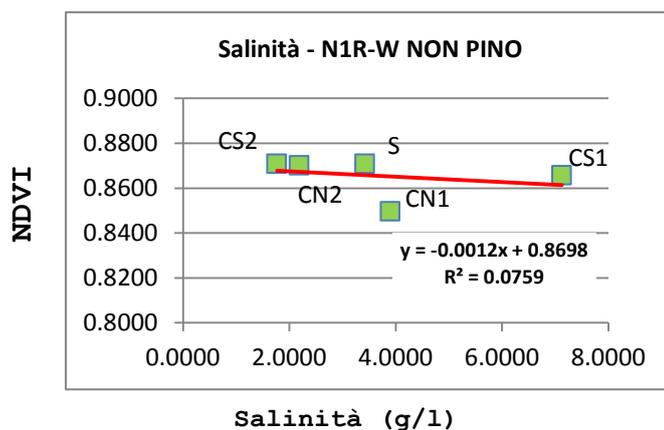


Fig.6.7 Correlazione tra i valori medi di salinità e di N1R-W per ciascuna SUB-ROI. Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1R

La correlazione è stata valutata anche pixel per pixel, per verificare se utilizzando le SUB-ROI NON PINO, a differenza delle ROI, questa ulteriore analisi restituisse informazioni utili con l'indice NDVI. Osservando in Fig.6.7 i coefficienti delle rette di regressione si conferma la distinzione tra SUB-ROI NON PINO situate ad ovest e ad est all'interno della pineta; infatti le SUB-ROI a ovest presentano pendenze positive (CS2:0.002, CN2:0.009, S:0.002), mentre quelle a est negative (CS1:-0.001, CN1:-0.007). Le pendenze risultano modeste a causa dei campioni di dati molti diffusi.

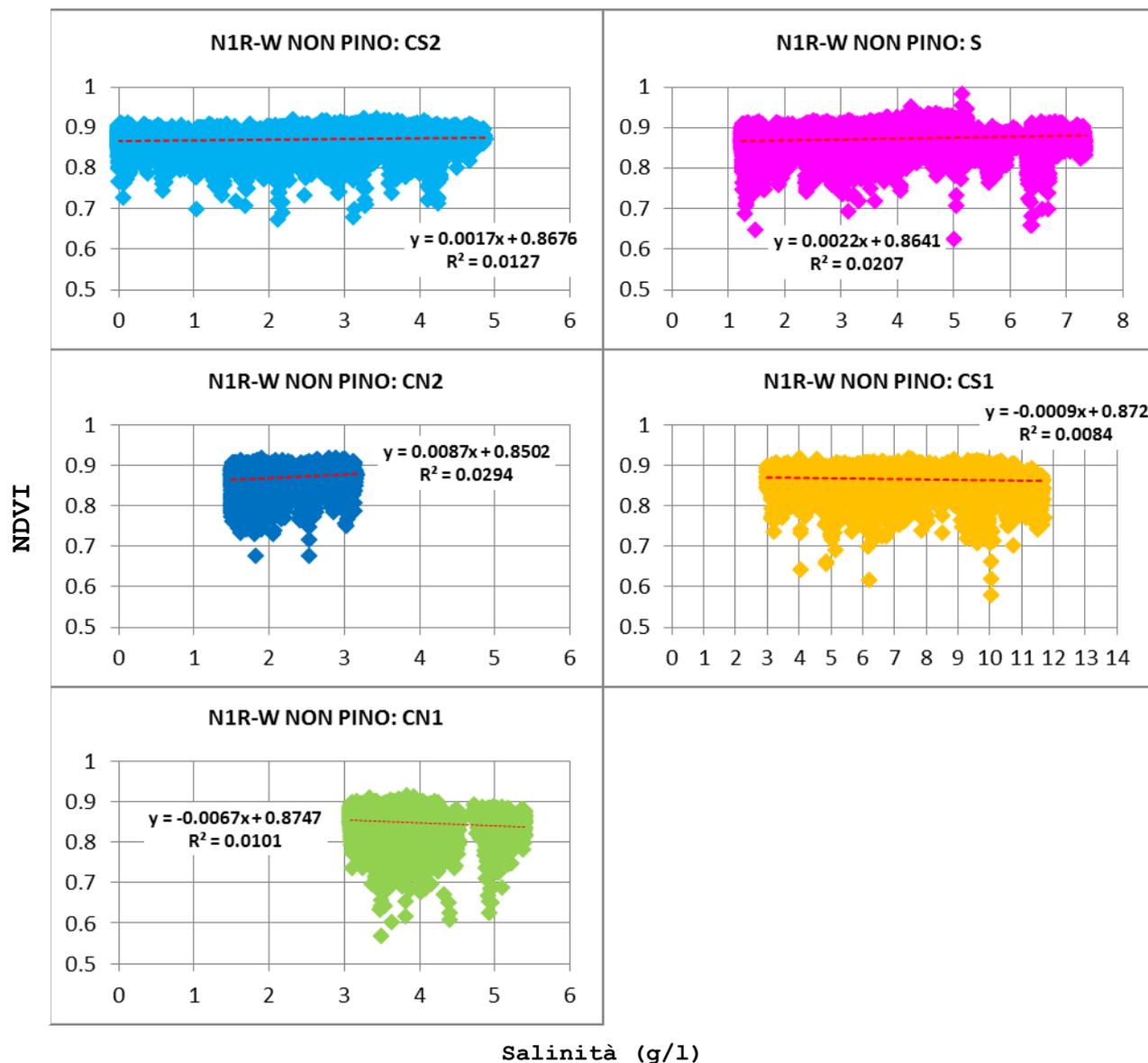


Fig.6.8 Correlazione pixel per pixel tra la salinità e valori di N1R-W per ciascuna SUB-ROI.
 Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1R-W

6.3 Nuovo indice NDVI: N1RE

I dati di N1RE relativi a ciascuna SUB-ROI, esportati in un file.txt contenente per ogni nodo estratto le coordinate cartografiche E,N oltre al valore di NDVI, vengono sottoposti ad analisi statistica per studiare la condizione di stress all'interno della pineta in funzione del comportamento di riflettanza della vegetazione.

Nella tabella seguente, Tab.6.3, si riportano i risultati ottenuti relativi a entrambe le classi di vegetazione considerate:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	NON PINO				PINO			
	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.
CN1	0.1357	0.5065	0.3203	0.033	0.0114	0.4668	0.2702	0.033
CN2	0.1723	0.5160	0.3297	0.032	0.0397	0.4867	0.2676	0.038
CS1	0.1528	0.4594	0.3131	0.037	0.0745	0.4914	0.2618	0.038
CS2	0.1708	0.4878	0.3276	0.034	0.1194	0.4731	0.2776	0.037
S	0.0541	0.5092	0.3307	0.040	0.1039	0.5092	0.2663	0.036

Tab.6.3 Valori minimi, valori massimi, valori medi e deviazioni standard di N1RE per ciascuna SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

In rosso sono evidenziate le situazioni peggiori corrispondenti ai valori N1RE medi minori, mentre in verde quelle migliori con valori medi maggiori.

Osservando la Tab.6.3 si nota come i valori medi delle SUB-ROI NON PINO siano più elevati dei corrispondenti valori delle SUB-ROI PINO; questo testimonia ancora una volta che, tenendo in considerazione la differente tipologia di vegetazione e apparato fogliare, le piante di pino siano in condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione all'interno della pineta. Infatti nell'area CS1, peggiore per entrambe le classi, l'indice N1RE è pari a 0.3131 per la SUB-ROI NON PINO e 0.2618 per la SUB-ROI PINO.

Di conseguenza, anche per l'indice N1RE, si può affermare che la presenza di piante di pino nelle ROI porta un abbassamento della media, proporzionale alla densità di tali piante. Si riconferma il

pino sia da considerarsi un fattore di stress nell'analisi della situazione interna alla pineta; la creazione di SUB-ROI NON PINO permette di studiare la condizione della vegetazione interna a San Vitale eliminando questo fattore di stress. Queste considerazioni vengono confermate dall'andamento degli istogrammi di frequenza relativa per le SUB-ROI NON PINO e PINO in Fig.6.9, in cui è evidente il differente intervallo di N1RE in cui ricadono i picchi di ciascuna classe: $0.32 \div 0.36$ per le SUB-ROI NON PINO, $0.24 \div 0.28$ per le PINO.

Le deviazioni standard rispetto al valore medio risultano essere contenute per l'indice studiato, minori di 0.04, di conseguenza tale parametro si assume rappresentativo della situazione interna alle SUB-ROI per entrambe le classi.

Basandosi sui valori medi si definiscono le classifiche tra le SUB-ROI NON PINO e le SUB-ROI PINO entrambe dalla migliore alla peggiore, ricordando che valori maggiori dell'indice coincidono con condizioni di minore stress della vegetazione.

Le classifiche ottenute vengono confrontate con quella della salinità e dell'indice N1RE applicato alle ROI ottenute nel Capitolo 5 (Tab.6.4).

	Salinità	ROI	NON PINO	PINO
1°	CS2	CS2	S	CS2
2°	CN2	CN2	CN2	CN1
3°	S	S	CS2	CN2
4°	CN1	CN1	CN1	S
5°	CS1	CS1	CS1	CS1


Salinità crescente
NDVI decrescente

Tab.6.4 Confronto classifiche ottenute con i Valori Medi, dalla situazione migliore alla peggiore, della salinità e dell'indice N1RE per le ROI, SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO

Confrontando le classifiche ottenute applicando l'indice alle ROI e alle SUB-ROI NON PINO, Tab.6.4, si nota solo come venga mantenuta la distinzione tra aree ad ovest, CS2, CN2 e S, e aree ad est nella pineta, CN1 e CS1; inoltre l'ordine risulta differente da quello riscontrato con l'indice N1R.

Infatti utilizzando le SUB-ROI NON PINO si riscontra la presenza delle ROI ad ovest nella pineta nei primi tre posti della classifica, S (0.3307), CN2(0.3297) e CS2(0.3276), mentre quelle situate ad est occupano il penultimo e l'ultimo posto, CN1(0.3203) e CS1(0.3131).

Di conseguenza i valori medi dell'indice N1RE ricavati dalle SUB-ROI NON PINO continuano a rispecchiare l'andamento del gradiente di salinità interno alla pineta. Ricordando la complessità nell'ottenere SUB-ROI NON PINO con vegetazione omogenea per tutte le aree e avendo considerato solamente alcune zone interne alle ROI, come spiegato precedentemente, si considerano i valori medi delle SUB-ROI solamente attendibili per la distinzione tra le SUB-ROI NON PINO situate a est da quelle a ovest. Questo aspetto è da tenere ben presente in questo caso in quanto la banda del RED-EDGE, combinata nell'indice, è molto sensibile allo stato di salute della singola pianta e quindi la riflettanza misurata è fortemente influenzata dalla disomogeneità di tipologia di piante, della classe TDF, selezionate. Questa forte sensibilità è dimostrata dall'andamento degli istogrammi di frequenza relativa per le SUB-ROI NON PINO che si avvicinano a distribuzioni normali (Fig.6.9).

La distinzione tra aree ad est e ad ovest non si riscontra utilizzando le SUB-ROI PINO a differenza di quanto verificato con l'utilizzo di N1R-W. La classifica ottenuta con tali SUB-ROI non si considera esplicativa della situazione interna la pineta essendo queste piante in condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione e in quanto la banda del RED-EDGE è fortemente sensibile allo stato di salute della pianta.

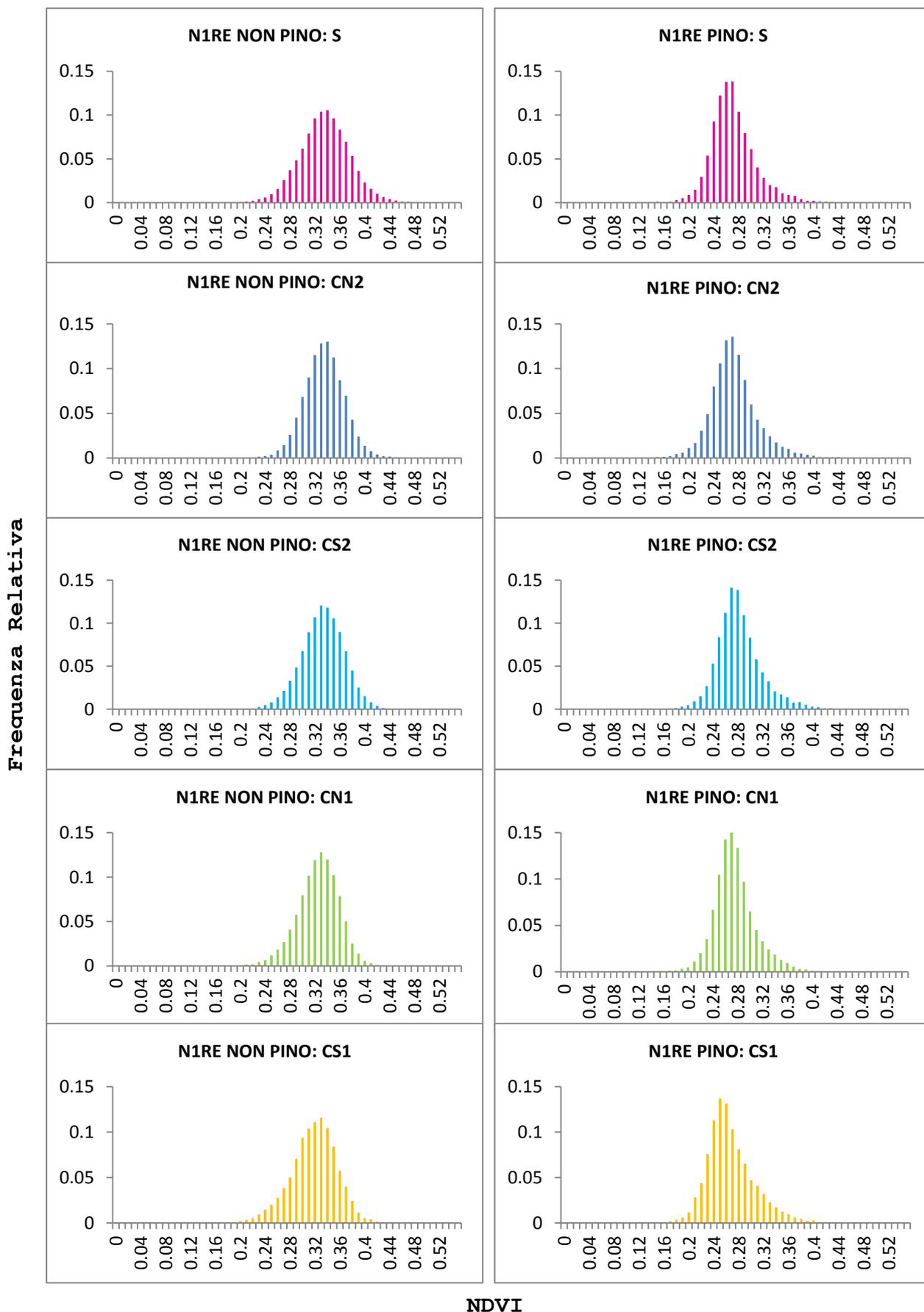


Fig.6.9 Istogrammi di frequenza relativa di N1RE per ciascuna SUB-ROI NON PINO(sx) e PINO(dx) .

Asse delle ascisse: NIRE; asse delle ordinate: Frequenza Relativa

6.4 Correlazione N1RE e salinità per le SUB-ROI NON PINO

Anche in questo caso scudendo le piante di pino, attraverso la creazione delle SUB-ROI NON PINO, si considera come unico fattore di stress l'intrusione di acqua salata nell'acquifero. Di conseguenza si valuta la correlazione, di tipo lineare, tra i valori medi di salinità e di N1RE delle SUB-ROI NON PINO.

Osservando il coefficiente della retta di regressione lineare(-0.0031) si conferma essere negativa la correlazione tra salinità e l'indice N1RE.

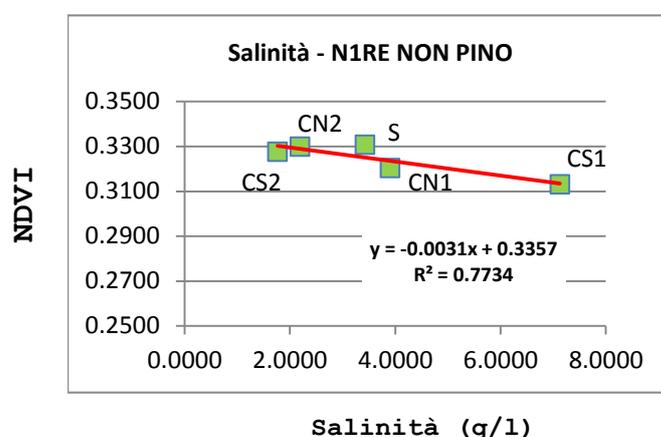


Fig.6.10 Correlazione tra valori medi di salinità e di N1RE per ciascuna SUB-ROI.
Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1RE

Anche per l'indice N1RE è stata realizzata la correlazione pixel per pixel. In questo caso i risultati ottenuti non contribuiscono a fornire informazioni utili in quanto, osservando le pendenze delle rette di regressione (Fig.6.11), solamente per la SUB-ROI CS1 risulta essere negativa (-0.0045). Anche in questo caso le pendenze risultano tutte modeste a causa dei campioni molto diffusi.

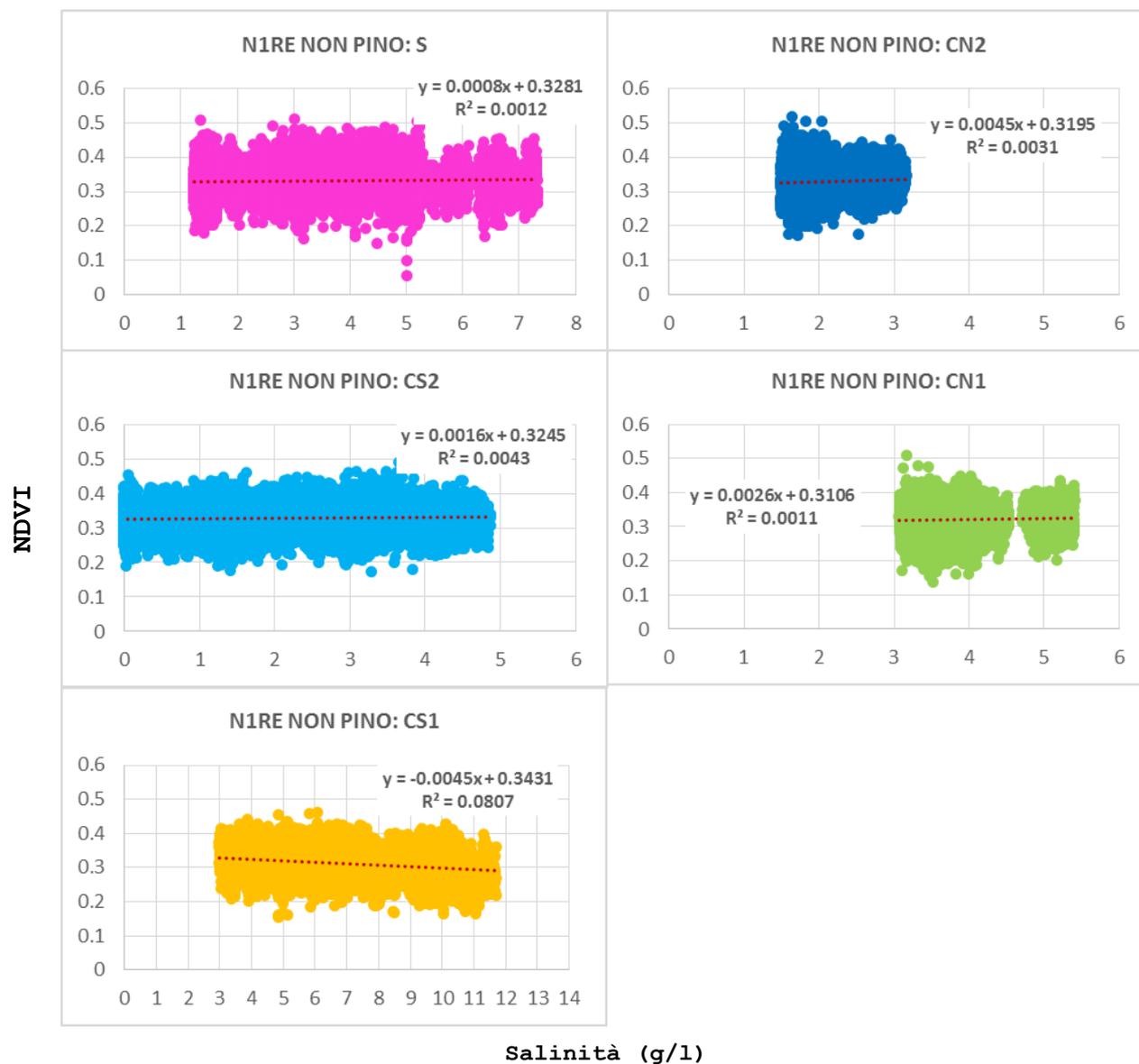


Fig.6.11 Correlazione pixel per pixel tra la salinità e valori di N1RE per ciascuna SUB-ROI.

Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: N1RE

6.5 Indice DATT

L'indice di Datt, come spiegato nel Capitolo 1, offre le prestazioni migliori in merito alla stima del contenuto di clorofilla, in quanto appare evidenziare una maggior correlazione rispetto agli indici proposti in precedenza. Si ricorda che tale indice risulta essere insensibile all'effetto di scattering della foglia ed è fortemente variato in relazione al contenuto di clorofilla della foglia stessa. A causa di questa sua sensibilità è stato utilizzato solamente associato alle SUB-ROI, in quanto garantiscono un grado di dettaglio maggiore. Anche i dati di DATT relativi a ciascuna SUB-ROI sono stati esportati in un file.txt, con le coordinate cartografiche E,N oltre al valore dell'indice, e analizzati statisticamente per studiare la condizione di stress all'interno della pineta basandosi sul comportamento di riflettanza della vegetazione.

Nella tabella seguente, Tab.6.5, si riportano i risultati ottenuti relativi a entrambe le classi di vegetazione considerate:

- Valore minimo;
- Valore massimo;
- Valore medio e deviazione standard.

AREA	NON PINO				PINO			
	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.	MIN	MAX	MEDIO	DEV.ST.
CN1	0.2827	0.7199	0.5269	0.038	0.0306	0.7188	0.4948	0.041
CN2	0.3278	0.7551	0.5320	0.037	0.0872	0.7453	0.4851	0.048
CS1	0.3052	0.6843	0.5123	0.043	0.1651	0.7636	0.4775	0.047
CS2	0.3262	0.6930	0.5289	0.040	0.2416	0.7277	0.4942	0.046
S	0.1168	0.7350	0.5323	0.046	0.2324	0.7817	0.4797	0.047

Tab.6.5 Valori minimi, valori massimi, valori medi e deviazioni standard di DATT per ciascuna SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO. In rosso le situazioni peggiori e in verde quelle migliori

In rosso sono evidenziate le situazioni corrispondenti ai valori DATT medi minori, mentre in verde quelli maggiori.

Osservando la Tab.6.5 si nota, anche in questo caso, come i valori medi delle SUB-ROI NON PINO siano più elevati dei corrispondenti valori delle SUB-ROI PINO; questo testimonia, tenendo in considerazione la differente tipologia di piante, come i pini siano in

condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione all'interno della pineta. Infatti nell'area peggiore per entrambe le classi (CS1) l'indice DATT è pari a 0.5123 per la SUB-ROI NON PINO e 0.4775 per la SUB-ROI PINO. Di conseguenza anche con l'indice DATT si conferma come la presenza dei pini sia da considerarsi un fattore di stress nell'analisi della situazione interna alla pineta; la creazione di SUB-ROI NON PINO permette di studiare la condizione della vegetazione interna a San Vitale eliminando questo fattore di stress. Queste considerazioni vengono confermate dall'andamento degli istogrammi di frequenza relativa per le SUB-ROI NON PINO e PINO in Fig.6.12, in cui è evidente il differente intervallo di DATT in cui ricadono i picchi di ciascuna classe.

Le deviazioni standard rispetto al valore medio risultano essere contenute per l'indice studiato, minori di 0.05, di conseguenza tale parametro si assume rappresentativo della situazione interna alle SUB-ROI per entrambe le classi.

Basandosi sui valori medi si definiscono le classifiche tra le SUB-ROI NON PINO e le SUB-ROI PINO entrambe dalla migliore alla peggiore, ricordando che valori maggiori dell'indice coincidono con condizioni di minore stress della vegetazione.

Le classifiche ottenute vengono confrontate con quella della salinità ottenuta nel Capitolo 5 (Tab.6.6).

	Salinità	NON PINO	PINO
1°	CS2	S	CN1
2°	CN2	CN2	CS2
3°	S	CS2	CN2
4°	CN1	CN1	S
5°	CS1	CS1	CS1



Salinità crescente

DATT decrescente

Tab.6.6 Confronto classifiche ottenute con i Valori Medi, dalla situazione migliore alla peggiore, della salinità e dell'indice DATT per SUB-ROI NON PINO e SUB-ROI PINO

Osservando la classifica ottenuta applicando l'indice alle SUB-ROI NON PINO, Tab.6.6, si nota come, anche in questo caso, venga mantenuta la distinzione tra aree ad ovest, CS2, CN2 e S, e aree ad est nella pineta, CN1 e CS1.

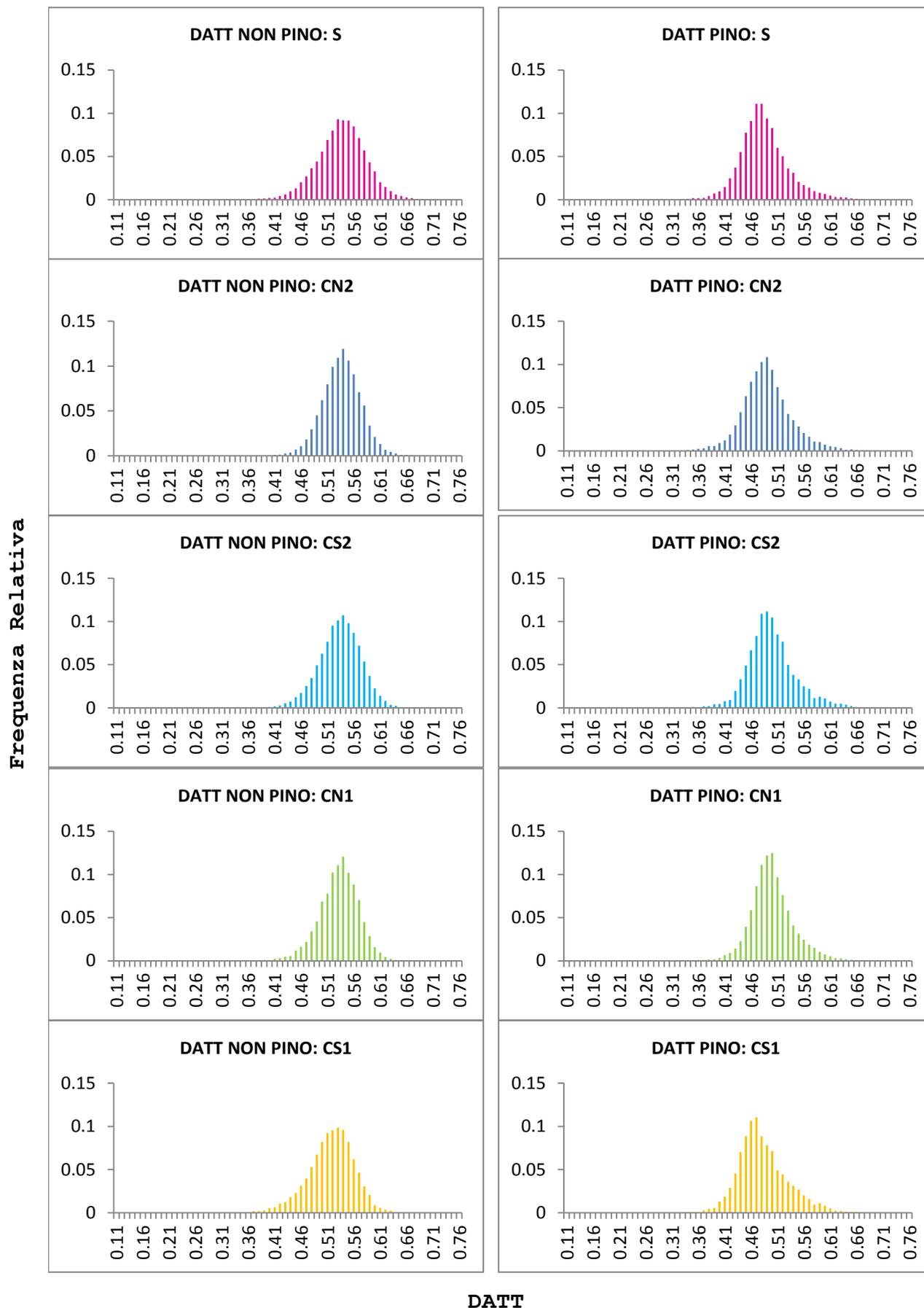
Infatti utilizzando le SUB-ROI NON PINO si riscontra la presenza delle ROI ad ovest nella pineta nei primi tre posti della classifica, S

(0.5323), CN2(0.5320) e CS2(0.5289), mentre quelle situate ad est occupano il penultimo e l'ultimo posto, CN1(0.5269) e CS1(0.5123).

Di conseguenza i valori medi dell'indice DATT ricavati dalle SUB-ROI NON PINO continuano a rispecchiare l'andamento del gradiente di salinità interno alla pineta. Ricordando la complessità nell'ottenere SUB-ROI NON PINO con vegetazione omogenea per tutte le aree e avendo considerato solamente alcune zone interne alle ROI, si considerano anche per questo indice, i valori medi delle SUB-ROI solamente attendibili per la distinzione tra le SUB-ROI NON PINO situate a est da quelle a ovest. Questo aspetto è da tenere ben presente utilizzando l'indice di DATT che risulta essere fortemente variato in relazione al contenuto di clorofilla della foglia e quindi allo stato di salute della singola pianta.

Come per l'indice N1RE, la distinzione tra aree ad est e ad ovest non si riscontra utilizzando le SUB-ROI PINO; la classifica ottenuta con tali SUB-ROI non si considera esplicativa della situazione interna la pineta essendo queste piante in condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione ed essendo l'indice DATT fortemente influenzato dal contenuto di clorofilla.

Dall'analisi statistica realizzata sui due indici maggiormente sensibili al contenuto di clorofilla DATT e N1RE, che sfruttano la banda RED-EDGE, si ottengono gli stessi risultati. In entrambi i casi la classifica riguardante le SUB-ROI NON PINO mostra la stessa graduatoria (S, CN2, CS2, CN1, CS1) e rispecchia il gradiente di salinità interno alla pineta. Analizzando le classifiche per le SUB-ROI PINO, in entrambi gli indici è la posizione occupata dall'area CN1 a non mantenere la distinzione tra est e ovest.



DATT

Fig.6.12 Istogrammi di frequenza relativa di DATT per ciascuna SUB-ROI NON PINO(sx) e PINO(dx).

Asse delle ascisse: DATT; asse delle ordinate: Frequenza Relativa

6.5.1 Correlazione tra DATT e salinità per le SUB-ROI NON PINO

Nuovamente, escludendo le piante di pino, attraverso la creazione delle SUB-ROI NON PINO, si considera come unico fattore di stress l'intrusione di acqua salata nell'acquifero. Di conseguenza si valuta la correlazione, di tipo lineare, tra i valori medi di salinità e di DATT delle SUB-ROI NON PINO.

Osservando il coefficienti della retta di regressione lineare(-0.0035) si conferma essere negativa la correlazione tra salinità e l'indice DATT.

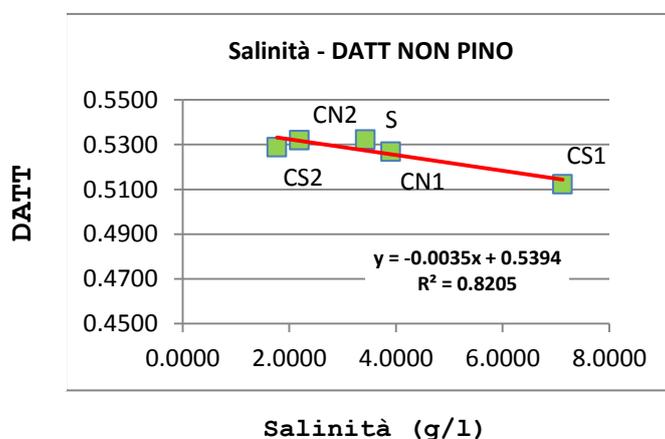


Fig.6.13 Correlazione tra la salinità e valori medi di DATT per ciascuna SUB-ROI.
Asse delle ascisse: salinità (g/l); asse delle ordinate: DATT

La analogia di comportamento tra N1RE e DATT è riscontrabile anche visivamente dal confronto dei grafici di correlazione con la salinità in cui la pendenza della retta di regressione risulta essere (-0.0031) per N1RE e (-0.0035) per il DATT.

6.6 Approfondimenti statistici

Per ciascun indice, solamente per le SOTTORI NON PINO, in quanto le piante di pino sono considerate un fattore di stress, si attua un'ulteriore e più raffinata analisi statistica. In questa analisi vengono calcolati per le SUB-ROI relative a ogni area:

- il valore di indice corrispondente al 5Percentile della SUB-ROI con valore di indice medio maggiore;
- la percentuale di pixel al di sotto del valore dell'indice corrispondente al 5Percentile per le rimanenti SUB-ROI;
- i momenti del II ordine Skewness e Kurtosis.

Si riportano inoltre gli istogrammi di frequenza relativa per avere una visualizzazione grafica delle informazioni ottenute dai dati numerici;

ricordando che si utilizza la frequenza relativa con lo scopo di rendere confrontabili i grafici di ciascuna SUB-ROI anche se appartenenti a differenti aree.

Si studiano i risultati ottenuti dall'analisi statistica per ciascuno indice e successivamente si procede al confronto.

➤ **N1R-W**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
NDVI 5 PERCENTILE				0.8324	
% PIXEL MINORI	0.200	0.048	0.078	0.049	0.072
SKEWNESS	-1.8844	-1.5781	-2.0243	-1.6743	-1.4315
KURTOSIS	6.9563	4.9570	8.5826	5.8554	4.7681

Tab.6.7 Statistiche relative al dato N1R-W. Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla SUB-ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di N1R-W corrispondente al 5Percentile per le rimanenti SUB-ROI.

La SUB-ROI con situazione migliore considerando la media dell'indice, è CS2.

Osservando la Tab.6.7 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.8324 individuato su CS2, siano contenute. Per S, seconda SUB-ROI in classifica, i pixel inferiori sono il 7% del totale; per la situazione intermedia CN2 la percentuale risulta essere inferiore al 5% quindi presenta meno pixel corrispondenti a situazione di stress rispetto all'area presa come riferimento; per le SUB-ROI a ovest della pineta CS1 e CN1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente circa l' 8% e il 20%. Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CN2 e CN1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.8324 di N1R-W sono rispettivamente il 4.8% e il 20%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta essere poco significativo, inoltre restituisce informazioni discordanti da quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le SUB-ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, non rispecchia quella ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.6.7, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. La SUB-ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CS1(-2.0243), seguita da CN1(-1.8844), proseguendo si trovano CS2(-1.6743), CN2(-1.5781) e S(-1.4315). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti superiori a 1.4 di conseguenza tutte le

distribuzioni presentano una marcata asimmetria. Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.6.7, si sottolinea come le distribuzioni abbiano tutte lo stesso comportamento presentando valori positivi: CS1(8.5826), CN1 (6.9563), CS2(5.8554), CN2(4.9570), S(4.7681). Vengono classificate tutte come distribuzioni leptocurtiche e l'andamento presenta maggiore allungamento rispetto alla distribuzione normale, più pronunciato in funzione dell'aumentare del valore. I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.6.14, dove per tutte le SUB-ROI NON PINO si riconosce il picco relativo all'intervallo 0.84÷0.9 di N1R-W riscontrato per le ROI in Fig.5.11.

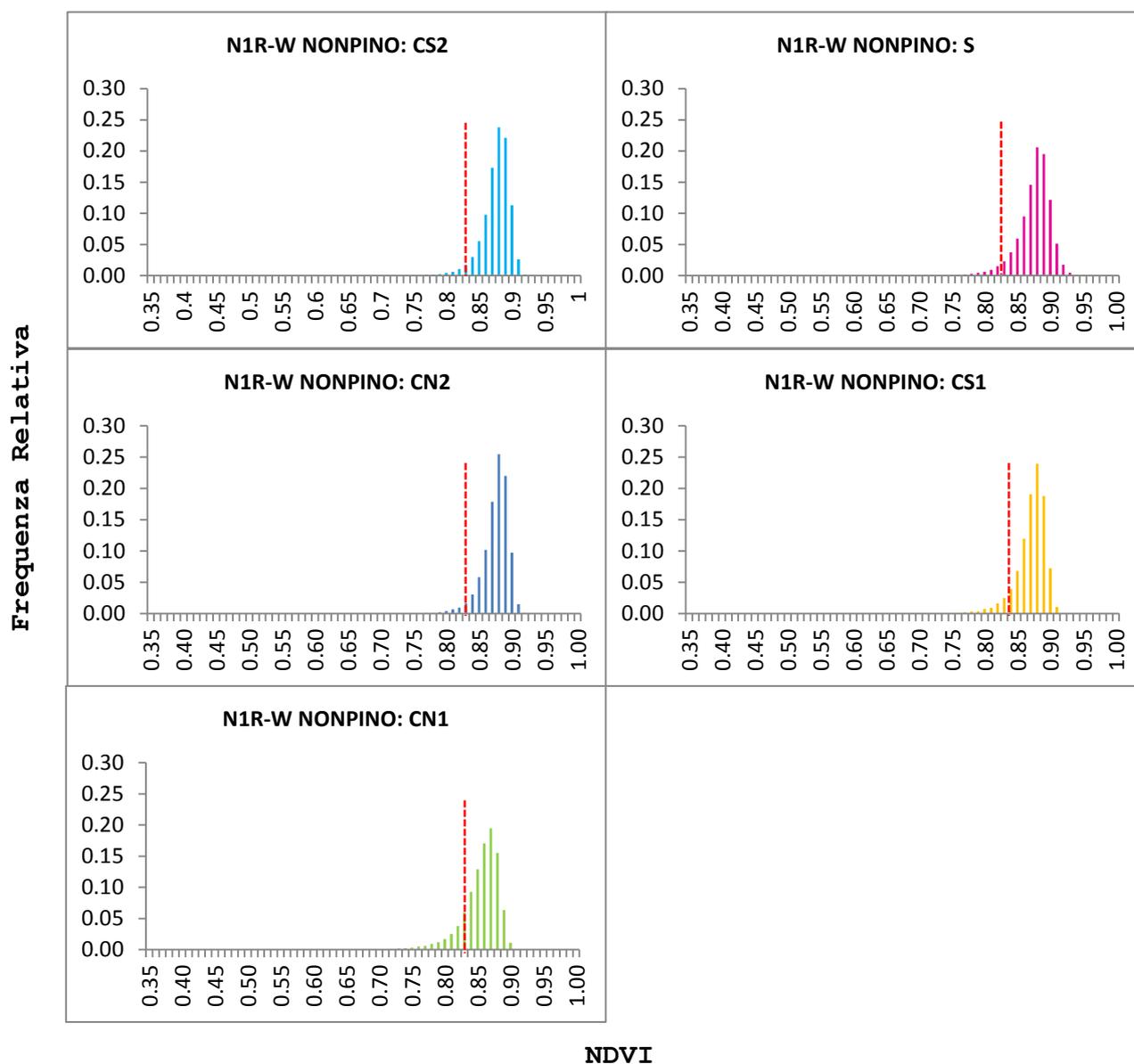


Fig.6.14 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna SUB-ROI dell'indice N1R-W. Asse delle ascisse: N1R-W; asse delle ordinate: Frequenza Relativa. La linea rossa corrisponde al 5Percentile

➤ **N1RE**

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
NDVI 5 PERCENTILE					0.2643
% PIXEL MINORI	0.055	0.021	0.097	0.039	0.050
SKEWNESS	-0.3574	0.0315	-0.3513	-0.1720	-0.0314
KURTOSIS	0.6906	0.7196	0.3736	0.2709	0.5919

Tab.6.8 Statistiche relative al dato N1RE. Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla SUB-ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di N1RE corrispondente al 5Percentile per le rimanenti SUB-ROI.

La SUB-ROI con situazione migliore è S, considerando come parametro la media, in discordanza con i risultati ottenuti finora.

Osservando la Tab.6.8 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.2643 individuato sulla SUB-ROI S, siano contenute. Per CS2, terza SUB-ROI in classifica, i pixel inferiori sono meno del 4%, in base ai risultati ricavati dal valore medio ci si aspetterebbe una percentuale maggiore al 5%; per CN2 la percentuale risulta addirittura essere circa il 2% quindi presenta meno pixel corrispondenti a situazione di stress rispetto all'area presa come riferimento; per le SUB-ROI a ovest della pineta CN1 e CS1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente meno del 6% e del 10%.

Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CN2 e CS1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.2643 di N1RE sono rispettivamente il 2% e il 10%, si può affermare che in questo caso il parametro del 5percentile risulta essere non significativo, inoltre restituisce informazioni discordanti da quelle ottenute nelle analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le SUB-ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, non rispecchia quella ottenuta basandosi sul valore medio.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.6.8, si evidenzia come le distribuzioni S, CS2, CN1 e CS1, presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori; mentre la SUB-ROI CN2 mostra la formazione di una coda a destra verso i valori di DN maggiori in quanto il momento è leggermente positivo. La SUB-ROI che presenta asimmetria più

pronunciata è CN1(-0.3574), seguita da CS1(-0.3513), proseguendo si trovano CS2(-0.1720), CN2(0.0315) e S(-0.0314). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti inferiori a 0.5 di conseguenza tutte le distribuzioni si avvicinano molto alla condizione di simmetria; si nota che la coda di CS2 è tale da distribuire pochi pixel su valori più bassi di NDVI mentre quella di CS1 concentra molti pixel su quegli stessi valori. Anche S presenta una maggior quantità di pixel concentrati in questi valori rispetto CS2.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.6.8, si sottolinea come le distribuzioni abbiano tutte lo stesso comportamento presentando valori positivi: CN2(0.7196), CN1(0.6906), S(0.5919), CS1(0.3736), CS2(0.2709). Vengono classificate tutte come distribuzioni leptocurtiche, ma essendo i valori del momento tutti inferiori all'unità si discostano poco dalla distribuzione normale.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.6.15.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa si nota come tutti gli andamenti si avvicinano a una distribuzione normale, di conseguenza risultano essere poco significativi. La variabilità casuale dei valori dell'indice è dovuta alla sensibilità dell'indice rispetto la variabilità della vegetazione e alle difficoltà di una selezione di vegetazione omogenea all'interno della stessa classe TDF(Thermophilic Deciduous Forest) per tutte le SUB-ROI. Infatti per questa tipologia di vegetazione analizzando le SUB-ROI NON PINO sono stati riscontrati valori di RED-EDGE in un intervallo di DN compresi tra 422 e 3686 (Tab.6.9).

AREA	NON PINO		
	MIN	MAX	MEDIO
CN1	422	3291	1828.595
CN2	455	3246	1893.374
CS1	568	2927	1918.219
CS2	566	3475	1933.570
S	458	3686	1858.662

Tab.6.9 Valori minimi, valori massimi, valori medi di RED-EDGE per ciascuna SUB-ROI NON PINO

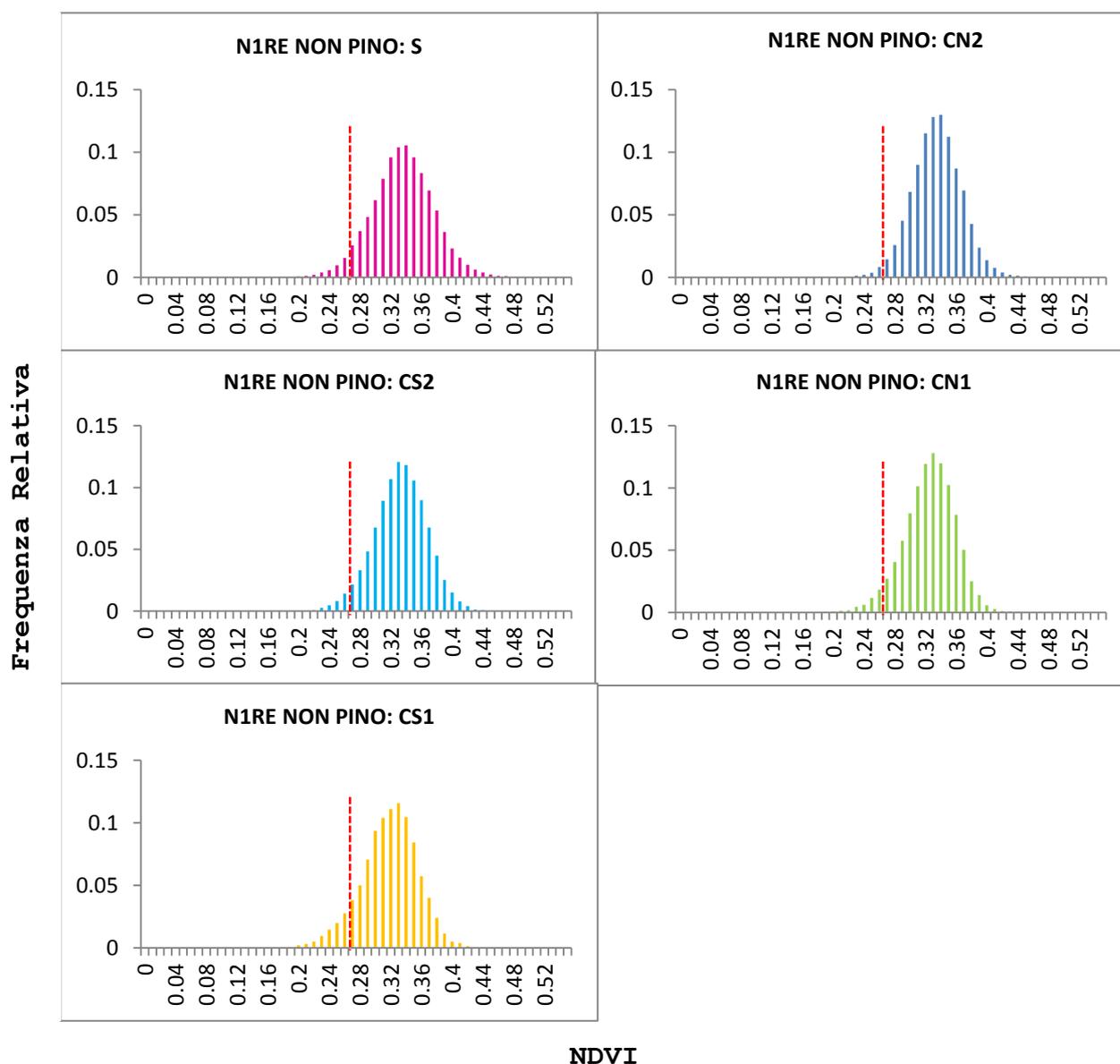


Fig.6.15 Istogrammi di Frequenza Relativa per ciascuna SUB-ROI dell'indice N1RE. Asse delle ascisse: N1RE; asse delle ordinate: Frequenza Relativa. La linea rossa corrisponde al 5Percentile

➤ DATT

STATISTICHE	CN1	CN2	CS1	CS2	S
5 PERCENTILE					0.4544
% PIXEL MINORI	0.038	0.021	0.095	0.038	0.050
SKEWNESS	-0.4018	-0.0525	-0.4333	-0.2621	-0.2510
KURTOSIS	1.1206	0.9265	0.5505	0.4131	1.0442

Tab.6.10 Statistiche relative al dato DATT. Il valore di 5Percentile è riportato nella colonna relativa alla SUB-ROI rispetto alla quale è stato calcolato. La riga % Pixel Minori indica la percentuale di pixel al di sotto del valore di DATT corrispondente al 5Percentile per le rimanenti SUB-ROI.

La SUB-ROI con situazione migliore risulta ancora S, in discordanza con i risultati ottenuti per le ROI e per l'indice N1R-W.

Osservando la Tab.6.10 si nota come le percentuali di pixel corrispondenti a condizione di sofferenza della vegetazione, ovvero al di sotto del valore di 5percentile 0.4544 individuato sulla SUB-ROI S, siano contenute. Per CS2, terza SUB-ROI in classifica, i pixel inferiori sono circa il 4%, in base ai risultati ricavati dal valore medio ci si aspetterebbe una percentuale maggiore al 5%; per CN2 la percentuale risulta essere pari al 2% quindi presenta meno pixel corrispondenti a situazione di stress rispetto all'area presa come riferimento; per le SUB-ROI a ovest della pineta CN1 e CS1, che ricoprono il penultimo e l'ultimo posto nella classifica, le percentuali sono rispettivamente circa il 4% e il 10%. Di conseguenza considerando le due situazioni estreme CN2 e CS1, in cui i pixel al di sotto del valore 0.4544 di DATT sono rispettivamente il 2% e il 10%, si può affermare che anche in questo caso il parametro del 5percentile risulta non essere significativo, inoltre restituisce informazioni discordanti da quelle ottenute in tutte le analisi precedenti. La classifica che si ottiene ordinando le SUB-ROI, da quella con % minore di pixel in condizioni di stress a quella con % maggiore, non rispecchia quella ottenuta basandosi sulla media, ma neanche la distinzione tra SUB-ROI ad ovest e ad est.

Analizzando i momenti del II ordine Skewness, Tab.6.10, si evidenzia come tutte le distribuzioni presentino valore negativo, di conseguenza mostrano la formazione di una coda a sinistra verso i valori di DN minori. La SUB-ROI che presenta asimmetria più pronunciata è CS1(-0.4333), seguita da CN1(-0.4018), proseguendo si trovano CS2(-0.2621),

S(-0.2510) e CN2(-0.0525). I valori di Skewness risultano essere in valore assoluto tutti inferiori a 0.5 di conseguenza tutte le distribuzioni si avvicinano molto alla condizione di simmetria; si nota anche in questo caso che la coda di CS2 è tale da distribuire pochi pixel su valori più bassi di DATT mentre quella di CS1 concentra molti pixel su quegli stessi valori. Anche S presenta una maggior quantità di pixel concentrati in questi valori rispetto CS2.

Esaminando i momenti del II ordine Kurtosis, Tab.6.10, si sottolinea come per questo momento le distribuzioni abbiano tutte lo stesso comportamento presentando valori positivi: CN1(1.1206), S(1.0442), CN2(0.9265), CS1(0.5505), CS2(0.4131). Vengono classificate tutte come distribuzioni leptocurtiche, ma essendo i valori del momento tutti prossimi o inferiori all'unità si discostano poco dalla distribuzione normale.

I comportamenti descritti dai momenti di II ordine sono riscontrati anche negli istogrammi di frequenza relativa in Fig.6.16.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa si nota come tutte gli andamenti si avvicinano a una distribuzione normale, di conseguenza risultano essere poco significativi. La variabilità casuale dei valori dell'indice è dovuta alla sensibilità dell'indice rispetto al contenuto di clorofilla interno alla foglia e alle difficoltà di una selezione di vegetazione omogenea all'interno della stessa classe TDF(Thermophilic Deciduous Forest) per tutte le SUB-ROI, sfruttando anche in questo caso la banda del RED-EDGE.

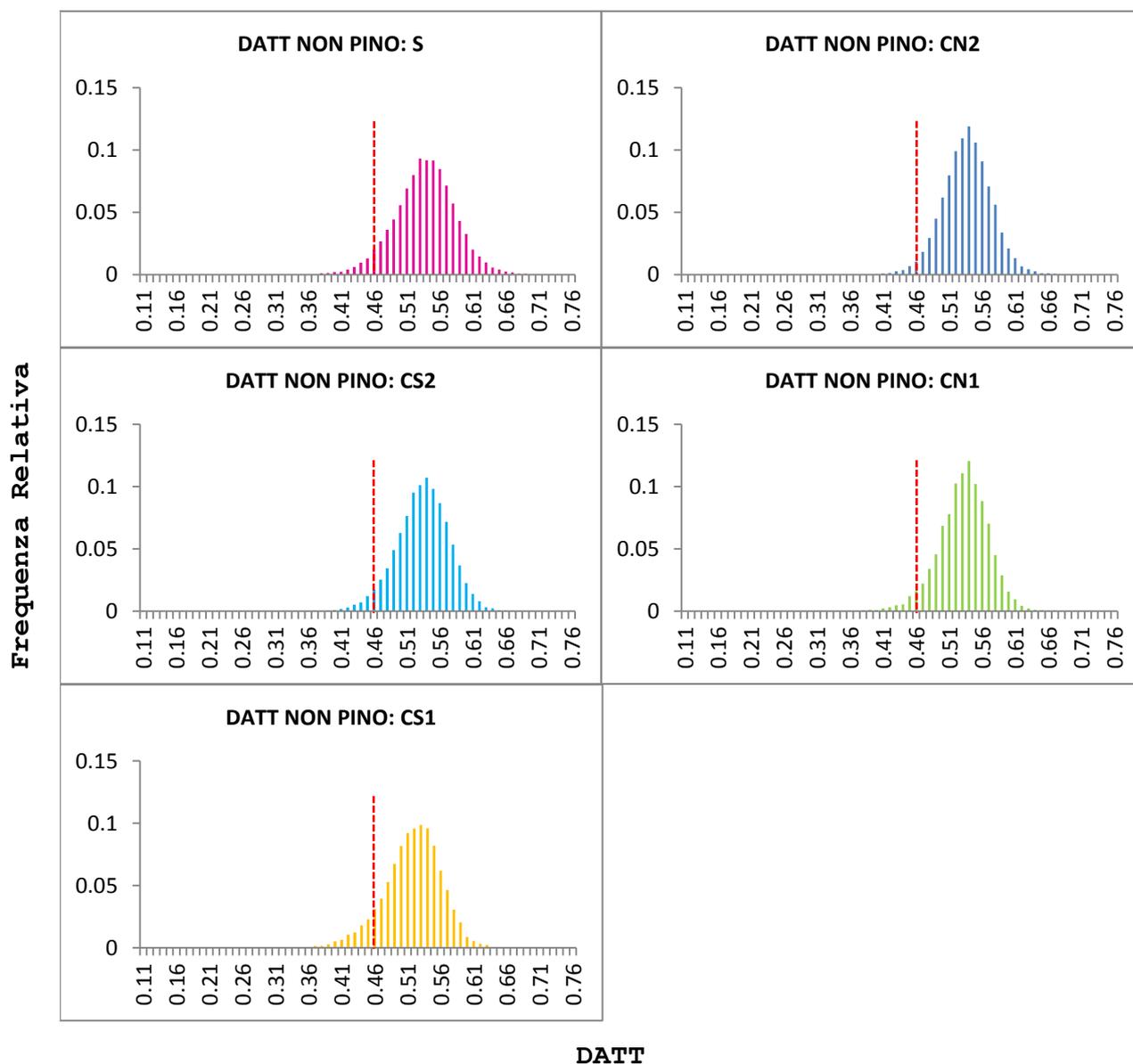


Fig.6.16 Istogrammi di frequenza relativa per ciascuna SUB-ROI dell'indice DATT. Asse delle ascisse: DATT; asse delle ordinate: Frequenza Relativa. La linea rossa corrisponde al 5Percentile

Dal confronto dei risultati ottenuti con N1RE e con il DATT, analizzando i momenti di II ordine, il parametro 5percentile e l'andamento degli istogrammi di frequenza relativa, si evidenzia lo stesso comportamento in entrambi gli indici applicati alle SUB-ROI NON PINO.

Per entrambi gli indici si afferma che i risultati ottenuti, considerando come parametri il 5percentile e i momenti di II ordine Skewness e Kurtosis, non contribuiscono a fornire informazioni utili riguardo la situazione delle SUB-ROI NON PINO interne alla pineta; infatti presentano un andamento quasi normale degli istogrammi di frequenza relativa per ciascuna SUB-ROI. Tali risultati portano a

concludere che sia N1RE, sia il DATT, sono fortemente influenzati dalla variabilità della vegetazione all'interno della stessa classe TDF(Thermophilic Deciduous Forest) e al contenuto di clorofilla della singola pianta; la sensibilità di entrambi gli indici è legata all'utilizzo della banda RED-EDGE, come riscontrato anche nell'applicazione alle ROI.

Dall'analisi statistica sull'indice N1R-W risulta che anche in questo caso il parametro 5percentile è poco significativo; mentre si riscontra un allontanamento dalla distribuzione normale confermato dai momenti di II ordine Skewness e Kurtosis. Di conseguenza si può affermare che l'indice N1R-W risulta essere meno sensibile alla variabilità della vegetazione all'interno della stessa classe TDF(Thermophilic Deciduous Forest), ma più influenzato dalla presenza di pini; infatti confrontando gli istogrammi di frequenza relativa delle SUB-ROI NON PINO con quelli delle rispettive ROI, si nota la presenza del solo picco compreso nell'intervallo $0.84 \div 0.9$ di N1R-W, mentre quello relativo ai valori $0.72 \div 0.78$ si ritrova nelle SUB-ROI PINO. Inoltre selezionando, grazie all'alta risoluzione dell'immagine, delle aree prive di piante di pino interne alle ROI, la classifica legata all'indice rispecchia quella ottenuta con l'andamento della salinità all'interno della pineta.

7 CONCLUSIONI

Nello studio eseguito si sono analizzati statisticamente dati multispettrali telerilevati a media (Aster) ed alta risoluzione spaziale (WorldView-2) sfruttati per l'individuazione degli effetti dell'intrusione di acqua salata nell'acquifero sulla vegetazione; inoltre sono stati elaborati statisticamente anche dati relativi a tale fattore di stress. L'oggetto di studio è stato la pineta di San Vitale.

Dalle analisi statistiche realizzate sui dati di salinità, ottenuti tramite interpolazione a partire da valori ottenuti da punti di campionamento a terra, si nota come la dimensione della cella non abbia influenza sui valori medi di ciascuna Regione di Interesse (ROI); infatti entrambe le risoluzioni del grigliato, 15 metri e 2 metri, restituiscono gli stessi risultati. Considerando il cambiamento del metodo di campionamento utilizzato e il differente posizionamento dei punti di analisi su cui si basa il processo di interpolazione, si constata che la concentrazione salina nelle acque sotterranee è rimasta quasi invariata nel tempo; infatti sia nel 2005, sia nel 2011, si riscontra un gradiente da ovest verso est all'interno della pineta grosso modo di pari entità. In entrambe le epoche la salinità è maggiore nelle ROI situate a est della pineta, più vicine alla Piallassa Baiona (CN1, CS1), mentre diminuisce spostandosi verso ovest (S, CN2, CS2).

Concentrandosi sull'obbiettivo principale della tesi, dalle analisi relative ai dati multispettrali telerilevati e dai rispettivi indici della vegetazione applicati alle ROI, il primo aspetto evidenziato è che applicando l'indice NDVI, ricavato dalla combinazione lineare delle bande RED e NIR1, al dato Aster a media risoluzione (N1R-A) e al dato WorldView-2 ad alta risoluzione (N1R-W), i risultati ottenuti sono in pieno accordo. La maggior risoluzione fornita da WV-2, a parità di area considerata e utilizzando come parametro di riferimento la media dell'indice NDVI(N1R), non fornisce quindi ulteriori informazione rispetto ad Aster; inoltre entrambi i dati relativi al 2011 confermano l'andamento riscontrato nel 2005 con Aster.

Di conseguenza, con l'utilizzo di un dato ad alta risoluzione spaziale, le problematiche e le incertezze incontrate al 2005 in

seguito all'applicazione dell'indice NDVI(N1R) alle ROI permangono nel 2011: in entrambe le epoche infatti non si verifica una perfetta correlazione tra la salinità, principale fattore di stress nella pineta, e l'indice NDVI(N1R).

I risultati continuano a essere influenzati dalla distribuzione della densità delle piante di pino all'interno della pineta; quindi anche con l'alta risoluzione, la presenza all'interno delle ROI di queste piante non autoctone condiziona la statistica della risposta spettrale della vegetazione registrata dal sensore.

Osservando gli istogrammi di frequenza relativa degli indici NDVI(N1R-A) e NDVI(N1R-W) emerge, invece, l'importanza dell'alta risoluzione; infatti negli istogrammi ottenuti da WorldView-2 si possono individuare due picchi distinti dovuti alla presenza di due specie distinte all'interno delle ROI: TDF(Thermophilic Deciduous Forest) e il Pinus Pinea(pino domestico). La distinzione dei picchi non è evidenziata con i dati Aster a causa della maggior varietà di piante all'interno del singolo pixel.

Analizzando i nuovi indici ottenibili grazie alla maggior risoluzione spettrale del sensore WorldView-2 si può affermare che le bande, inserite nella combinazione lineare caratteristica dell'indice NDVI, portatrici di informazioni differenti e non ridondanti sono la RED e la RED-EDGE; al contrario il cambiamento della banda di riferimento del NIR non mostra la stessa influenza. Utilizzando come parametro di riferimento il valor medio, NDVI(N1RE) permette di superare i dubbi e le incertezze incontrate con l'indice precedente: i risultati ottenuti rispecchiano il gradiente di salinità nelle acque sotterranee. La differenza tra l'utilizzo della banda RED e RED-EDGE è confermata dall'approfondimento statistico: i risultati ottenuti per l'indice NDVI(N1RE) non contribuiscono a fornire ulteriori informazioni utili in quanto le distribuzioni presentano un andamento prossimo a quello normale; mentre con l'indice NDVI(N1R-W) il parametro del 5percentile risulta essere significativo per distinguere le due condizioni limite(CS2 e CN1), meno per le situazioni intermedie.

Analizzando statisticamente gli indici NDVI(N1R-W), NDVI(N1RE) e DAT applicati alle SUB-ROI NON PINO(TDF) e PINO(Pinus Pinea) individuabili tramite l'alta risoluzione spaziale e spettrale, si nota come i valori medi delle SUB-ROI NON PINO siano più elevati dei corrispondenti

valori delle SUB-ROI PINO; l'andamento è confermato dagli istogrammi di frequenza relativa, in cui le SUB-ROI NON PINO mostrano distribuzioni spostate verso valori maggiori di indice rispetto a quelle PINO. Questo comportamento conferma, tenendo in considerazione la differente tipologia di vegetazione e di apparato fogliare, che le piante di pino sono in condizioni di stress a prescindere dalla loro posizione all'interno della pineta.

Inoltre con l'indice NDVI(N1R-W) si ottengono valori medi delle SUB-ROI PINO e delle SUB-ROI NON PINO che ricadono negli intervalli di N1R-W in cui si sono riscontrati per gli istogrammi di frequenza relativa delle ROI i due picchi; questo conferma l'individuazione delle due specie di vegetazione: TDF e il pino domestico. Applicando l'indice NDVI(N1R-W) alle SUB-ROI NON PINO si mantiene la distinzione tra le SUB-ROI ad ovest e quelle situate ad est, rispecchiando l'andamento del gradiente di salinità interno alla pineta e confermando l'influenza della densità dei pini sui risultati riferiti alle ROI. In entrambi gli indici DATT e NDVI(N1RE) la graduatoria riguardante le SUB-ROI NON PINO è la stessa (S, CN2, CS2, CN1, CS1) e rispecchia il gradiente di salinità interno alla pineta, con la distinzione tra le SUB-ROI a ovest da quelle ad est. Dall'approfondimento statistico sull'indice N1R-W si riscontra un allontanamento dalla distribuzione normale, quindi risulta essere poco influenzato dalla variabilità della vegetazione all'interno della stessa classe TDF.

Di conseguenza si può affermare che la presenza di piante di pino nelle ROI porta un abbassamento del valore medio dell'indice proporzionale alla densità di tali piante, e conferma come la presenza dei pini sia da considerarsi un fattore di stress nell'analisi della situazione interna alla pineta. Grazie al vantaggio dell'alta risoluzione, la creazione di SUB-ROI NON PINO permette di studiare la condizione della vegetazione interna a San Vitale eliminando questo fattore di stress.

In seguito a tutti i risultati ottenuti nello studio condotto si può affermare che, nell'analisi degli effetti dell'intrusione di acqua salata sulla vegetazione, l'alta risoluzione fornisce il vantaggio di poter discriminare e individuare con maggior precisione e grado di dettaglio le aree omogenee, riuscendo ad escludere un eventuale ulteriore fattore di stress non distribuito uniformemente. La maggior

risoluzione spettrale, in particolare la presenza della banda RED-EDGE, risulta essere più sensibile alla tipologia di vegetazione all'interno della stessa classe e alla condizione di salute della singola pianta, permettendo il superamento della presenza di un eventuale ulteriore fattore di stress all'interno dell'area di interesse.

In conclusione per aree boschive interessate dal problema dell'intrusione salina, la procedura presentata permette di riconoscere, all'interno di una copertura omogenea, la vegetazione stressata. Di conseguenza, il dispendio di risorse, temporali ed economiche, richiesti dalle campagne di monitoraggio a terra, può essere ridotto, circoscrivendo misure e interventi nelle aree maggiormente colpite.

Per aree di studio in cui la salinità è accompagnata da altri fattori di stress distribuiti in modo omogeneo e uniforme l'utilizzo di dati a media risoluzione spaziale, e con minor risoluzione spettrale, fornisce ottimi risultati e le informazioni ottenute rispecchiano quelle che si avrebbero supportando un maggior onere economico dovuto all'acquisto di dati ad alta risoluzione.

In situazioni più complesse, dove la distribuzione degli altri fattori di stress non è uniforme, la media risoluzione geometrica e la minor risoluzione spettrale presentano alcuni limiti, che possono essere parzialmente superati dalla conoscenza dell'andamento degli altri fattori di stress; in questo caso l'apporto fornito dall'utilizzo di dati ad alta risoluzione spaziale e con maggior risoluzione spettrale risulta essere comunque importante.

L'eventuale supporto dell'onere economico deve essere valutato anche in funzione dell'obiettivo e del grado di dettaglio dello studio che si vuole realizzare.

Lo studio relativo alla pineta di San Vitale, particolare area di interesse ambientale, può essere allargato all'intera penisola italiana caratterizzata dall'intrusione di acqua salata in più punti lungo la costa. Noto che la gran parte del territorio lungo le coste è adibito a colture, un possibile sviluppo è il riconoscimento di colture più o meno stressate a seguito dell'intrusione di acqua salata nell'acquifero sotterraneo.

Ringraziamenti

I ringraziamenti vanno, in primis, al Professor Maurizio Barbarella per l'opportunità concessami e per i preziosi consigli e aiuti, oltre al grande tempo dedicatomi, che sono stati di enorme importanza per portare a termine la tesi e per ampliare le mie conoscenze.

Ringrazio l'Ing. Michaela De Giglio per il suo costante supporto e appoggio, oltre alla massima disponibilità e ai suggerimenti fornitimi che sono stati fondamentali per portare a termine con successo lo studio e per una mia crescita personale.

Grazie anche al Dott. Nicholas Greggio per l'importantissimo apporto fornito alle analisi svolte e alla grande disponibilità sempre garantitami.

Grazie a queste persone che mi hanno fatto sentire immediatamente parte di un gruppo; il tempo dedicatomi e la loro costante presenza hanno agevolato enormemente questa esperienza oltre a renderla estremamente importante e formativa.

Ringrazio inoltre l'intera sezione di Topografia, del dipartimento del DICAM, per avermi accolto all'interno dei loro uffici e avermi fatto sentire coinvolto e parte di loro mostrandomi sempre massima gentilezza, disponibilità e cortesia.

Un particolare pensiero devo rivolgerlo a mia madre, mio padre e tutta la mia famiglia (anche i cinque a 4 zampe) che mi hanno sempre supportato e incoraggiato; a tutti i miei amici fonte di distrazione e sempre presenti; a Max La Rosa, Pino Ligabue, Andrea Menozzi, Davide Balugani e tutto lo staff della Polisportiva Galileo (la mia seconda famiglia) che mi hanno permesso e lo fanno ancora di crescere personalmente; e ad Alice, fondamentale presenza nella mia vita senza la quale non sarei riuscito a portare a termine questo percorso, come altri.

In ultimo, ma assolutamente non per importanza, ringrazio la mia compagna di corso Stefania con la quale in questi due anni ho

lavorato, studiato e imparato tanto sia dal punto di vista scolastico e lavorativo, ma soprattutto umano.

Bibliografia

- Abrams M., Hook S., Ramachandran B. ASTER User Handbook, Version 2.
- Aguilar, C., Zinnertb, J.C., Poloa, M.R., Young, D.R. (2012). NDVI as an indicator for changes in water availability to woody vegetation. *Ecological Indicators*.
- Antonellini, M., Mollena, P., Giambastiani, B.M.S., Bishop, K., Caruso, L., Minchio, A., Pellegrini, L., Sabia, M., Ulazzi, E., Gabbianelli, G. (2008). Salt water intrusion in the coastal aquifer of southern Po Plain, Italy. *Hydrogeology journal*.
- Antonellini, M., Mollema, P. (2010). Impact Of Groundwater Salinity On Vegetation Species Richness In The Coastal Pine Forests And Wetlands Of Ravenna, Italy. *Ecological Engineering*.
- Asner, G.P. (1998). Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*.
- Avantaggiato A. (2011). Utilizzo di dati satellitari per l'analisi degli effetti dell'intrusione di cuneo salino sulla vegetazione costiera.
- Barbarella M., De Giglio M., Greggio N. (2013). Dati ASTER per la valutazione dello stato di salute di aree costiere vegetate interessate da salinizzazione.
- Bassi, A. (2004). Guida alla flora della Pineta San Vitale, vol. 2 Schede e illustrazioni, *Uomo e natura*. Longo Editore Ravenna.
- Bhattarai N., Quackenbush L.J., Calandra L., Jungho Im, Teale S.(2011). Spectral analysis of scotch pine infested by sirenix noctilio.
- Borel C.C.(2010). Vegetative canopy parameter retrieval using 8-band data.
- Boyd, D.S., Foody, G.M., Curran, P.J. (1999). The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths (3.0-5.0 mm). *International Journal of Remote Sensing*.
- Buscaroli, A., Zannoni, D. (2010). Influence of ground water on soil salinity in the San Vitale Pinewood (Ravenna-Italy). *Agrochimica*.
- Campbell, J.B. (1996). *Introduction to Remote Sensing*. New York, USA: The Guilford Press.
- Canada Centre for Remote Sensing. Fundamentals of Remote Sensing.
- Carter G.A., Knapp A.K.(2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration .
- Chaves, M.M., Flexas, J., Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*.
- Comune di Ravenna (2008a). Piano Territoriale del Parco Regionale del Delta del Po - Stazione: Pineta di San Vitale e Pialasse di Ravenna.

Diani, L., Ferrari, C. (2007). La vegetazione della Pineta di San Vitale e il pattern spaziale di Pinus Pinea. In: *Monitoraggio e salvaguardia della Pineta di San Vitale e Classe*. Rapporti Tecnici, Comune di Ravenna 2007.

DigitalGlobe(2010). The Benefits of the Eight Spectral Bands of WorldView-2.

DigitalGlobe(2011). Imagery Support Data (ISD) Documentation .

DigitalGlobe(2010). Radiometric Use of WorldView-2 Imagery.

Datt B. (1998). A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves.

ENVI User's Guide, ENVI Version 4.1(2004)

FLAASH Module (2009). Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide, ENVI Version 5.0. ITT Visual Information Solutions, Boulder, CO.

Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Peñuelas, J., Valentini, R. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*.

Gausman, H.W., 1982. Visible light reflectance, transmittance, and absorptance of differently pigmented cotton leaves. *Remote Sensing of Environment*.

Giambastiani B.M.S (2007). Evoluzione idrologica e idrogeologica della pineta di San Vitale (Ravenna)

Giambastiani, B.M.S., Antonellini, M., Oude Essink, G. HP., Stuurman, R.J. (2007). Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model. *Journal of Hydrology*.

Giambastiani, B.M.S., Mollema, P., Antonellini, M. (2009). Groundwater management in the Northern Adriatic Coast (Ravenna, Italy): new strategies to protect the coastal aquifer from saltwater intrusion. In: König, L.F., Weiss, J.L. (Eds.), *Groundwater. Modeling, Management, and Contamination* (pp. 203-230). New York, USA: Nova Science Publishers.

Ginanni, F. (1774). Istoria civile e naturale delle Pinete Ravennati nella quale si tratta della loro origine, situazione, fabbriche antiche, e moderne, terre molteplici, acqua, aria, fossili, vegetabili, &c: Opera postuma. Generoso Salomoni.

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Merzlyak, M.N. (1996). Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*

Greggio, N., Antonellini, M., Mollema, P. (2012). Irrigation Management in Coastal Zones to Prevent Soil and Groundwater Salinization. In: Abrol, V., Sharma, P. (Eds), *Resource Management for Sustainable Agriculture*.

Greggio (2013). Individuazione di tecniche di gestione idrica-agronomica e di ricarica dell'acquifero freatico costiero per limitare la salinizzazione delle acque sotterranee e dei suoli.

Gutierrez-Rodriguez, M., Escalante-Estrada, J.A., Rodriguez-Gonzalez, M.T. (2005). Canopy Reflectance, Stomatal Conductance, and Yield of Phaseolus vulgaris L. and Phaseolus coccinues L. Under Saline Field Conditions. *International Journal of Agriculture & Biology*.

Latif Z.A., Zamri I., Omar H. (2012). Determination of Tree Species using Worldview-2 data.

Lazzari G., Merloni N., Saiani, D. (2009) - *Flora, Riserve Naturali dello Stato nell'area costiera di Ravenna Parco Delta del Po - Emilia Romagna. Parco Delta del Po. Quaderni dell'Ibis, n.3. Ravenna, Italy: Tipografia Moderna.*

Le Maire, G., Francois, C., Dufrene, E.(2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment.*

Maglione P., Claudio Parente C., Vallario A.(2013). Using worldview-2 satellite imagery to support geoscience studies on phlegraean area.

Main R. ,Moses Azong Cho, Mathieu R,. O'Kennedy M.M., Ramoelo A.(2011). An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation Susan Koch.

Marshall V., Lewis M. a, Ostendorf B.(2012). Do additional bands (coastal, nir-2, red-edge and yellow) in worldview-2 multispectral imagery improve discrimination of an invasive tussock, buffel grass (*Cenchrus ciliaris*)?

MutangaO, Elhadi Adama,E., Azong Cho(2012). High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm.

Naumann, J.C., Anderson, J.E., Young, D.R. (2008). Linking physiological responses, chlorophyll fluorescence and hyperspectral imagery to detect salinity stress using the physiological reflectance index in the coastal shrub, *Myrica cerifera*. *Remote sensing of environment.*

Peñuelas, J. (1998). Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science.*

Piccoli, F., Gerdol, R., Ferrari, C. (1991). Vegetation Map of St. Vitale pinewood (Northern Adriatic coast, Italy). *Phytocoenosis.*

Regione Emilia Romagna - Servizio Cartografico e Geologico, 1999a. Carta della Vegetazione del Parco Regionale del Delta del Po - Stazione "Pineta di San Vitale e Pialasse di Ravenna".

Richardson A.D., Duigan S.P., Berlyn G.P.(2001). An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content.

Wolf A.(2010). Using WorldView 2 Vis-NIR MSI Imagery to Support Land Mapping and Feature Extraction Using Normalized Difference Index Ratios.

Sitografia

<http://www.amibot.org>
<http://asterweb.jpl.nasa.gov>
<http://www.attiasita.it/>
<http://www.c-agg.org>
<http://www.calval.cr.usgs.gov>
<http://www.digitalglobe.com>
<http://geology.isu.edu/>
<http://gias.regione.emilia-romagna.it>
<http://www.gisitalia.it/>
<http://glovis.usgs.gov>
<http://www.intechopen.com>
<http://www.jstor.org>
<http://www.landinfo.com>
<http://onlinelibrary.wiley.com>
<http://www.planetek.it>
<http://www.pubs.acs.org>
<http://www.publish.csiro.au>
<http://www.regione.emilia-romagna.it>
<http://www.ricercaforestale.it/>
<http://www.satimagingcorp.com>
<http://www.sciencedirect.com>
<http://www.seos-project.eu/>
<http://www.sisef.it>
<http://www.usda.gov>
<http://www.wa.gov.au>
<http://it.wikipedia.org>