

## INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>1. MORFOLOGIA LAGUNARE .....</b>	<b>5</b>
1.1 La laguna di Venezia .....	5
1.2 Area di studio .....	7
1.3 Le barene: caratteristiche ed evoluzione .....	8
1.4 La zonazione delle alofite .....	13
1.5 Le barene e le alofite della laguna di Venezia come indicatori morfologici...14	
1.5.1 Alofite e quote d'insediamento caratteristiche .....	15
<b>2. CAMPAGNE DI ACQUISIZIONE DATI .....</b>	<b>19</b>
2.1. Campagne di telerilevamento .....	19
2.2. Il sensore satellitare QuickBird .....	20
2.3. Sensori aerei: ROSIS e CASI.....	21
2.4. Acquisizione dati in campo .....	22
2.4.1. Dati per la taratura.....	23
2.4.1.1. Determinazione delle risposte spettrali.....	23
2.4.1.2. Punti di riferimento per la georeferenziazione .....	23
2.4.2. Dati per la classificazione delle immagini .....	24
2.4.2.1. Copertura specifica: attribuzione delle percentuali.....	25
<b>3. TRATTAMENTO DEI DATI TELERILEVATI .....</b>	<b>27</b>
3.1. Pre-trattamento dei dati telerilevati.....	27
3.1.1 La correzione geometrica .....	27

3.1.2. <i>La correzione atmosferica</i> .....	28
<b>3.2 Metodi di classificazione</b> .....	<b>29</b>
3.2.1. <i>Classificazione di dati multitemporali</i> .....	30
3.2.2 <i>Verifica della qualità della classificazione</i> .....	31
<b>3.3. Dati usati per la classificazione e la validazione</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4 Analisi delle firme spettrali</b> .....	<b>36</b>
<b>3.5 Indici di vegetazione</b> .....	<b>39</b>
<b>4.CLASSIFICAZIONE DEI DATI TELERILEVATI</b> .....	<b>41</b>
<b>4.1 Effetti stagionali sulla classificazione di dati multispettrali QuickBird</b> .....	<b>41</b>
4.1.1 <i>Classificazione dell'immagine acquisita il 16 maggio 2002</i> .....	42
4.1.2 <i>Classificazione dell'immagine acquisita il 10 febbraio 2003</i> .....	43
4.1.3 <i>Classificazione dell'immagine acquisita il 25 luglio 2003</i> .....	44
4.1.4 <i>Classificazione dell'immagine acquisita il 10 ottobre 2003</i> .....	47
<b>4.2 Classificazione multitemporale dei dati multispettrali QuickBird</b> .....	<b>47</b>
<b>4.3 Classificazione dei dati QuickBird pancromatici</b> .....	<b>51</b>
<b>4.4 Confronto tra sensori dai risultati della classificazione</b> .....	<b>53</b>
<b>4.5 Discussione</b> .....	<b>56</b>
<b>5.ANALISI DEI CAMBIAMENTI STAGIONALI IN BARENA DI SAN FELICE</b> .....	<b>59</b>
<b>5.1 Metodi di Analisi dei cambiamenti in serie temporali</b> .....	<b>61</b>
<b>5.2 Metodi di analisi dei cambiamenti pre-classificazione</b> .....	<b>62</b>
5.2.1 <i>Sovrapposizione di immagini</i> .....	62
5.2.2 <i>Differenza tra immagini</i> .....	63
<b>5.3 Metodi di quantificazione dei cambiamenti post-classificazione</b> .....	<b>63</b>

<b>5.4 Risultati dell'analisi dei cambiamenti su scala stagionale.....</b>	<b>65</b>
5.4.1 <i>Sottrazione di immagini</i> .....	71
5.4.2 <i>Analisi dei cambiamenti post-classificazione</i> .....	75
<b>5.4 Discussione.....</b>	<b>77</b>
<b>6. ANALISI DEI CAMBIAMENTI NELLA DISTRIBUZIONE SPAZIALE .....</b>	<b>79</b>
<b>6.1 Strumenti per la definizione delle caratteristiche del paesaggio .....</b>	<b>79</b>
<b>6.2 LSM utilizzate nello studio .....</b>	<b>81</b>
6.2.1 <i>Numero di cluster</i> .....	81
6.2.2 <i>Area media</i> .....	82
6.2.3 <i>Confronto area-perimetro</i> .....	82
6.2.4 <i>Edge Density</i> .....	82
6.2.5 <i>Interspersion and Juxtaposition Index: IJI</i> .....	83
<b>6.3 Uso dei momenti per descrivere i patch .....</b>	<b>84</b>
<b>6.4 Risultati del confronto interstagionale.....</b>	<b>85</b>
6.4.1 <i>Risultati ottenuti dall'applicazione di LSM</i> .....	86
6.4.2 <i>Risultati ottenuti dall'analisi dei momenti</i> .....	90
<b>6.5 Discussione.....</b>	<b>94</b>
<b>7 CONCLUSIONI.....</b>	<b>97</b>
<b>APPENDICE A</b>	
SCHEDE FLORISTICHE.....	
<b>APPENDICE B</b>	
CARATTERISTICHE DEI SENSORI REMOTI UTILIZZATI NELLO STUDIO .....	115
<b>APPENDICE C</b>	
MATRICI DI CORRELAZIONE .....	116
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>119</b>



## ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1.1 - LAGUNA DI VENEZIA.....	5
FIGURA 1.2 - SITI DI CAMPIONAMENTO IN LAGUNA NORD.....	7
FIGURA 1.3 – CONFRONTO DI IMMAGINI DI UNA PORZIONE DELLA BARENA DI SAN FELICE A 48 ANNI DI DISTANZA. IN ALTO (A) RIPRESA AEREA DEL 1955, SOTTO (B) RIPRESA CON SENSORE PANCRONMICO DEL SATELLITE QUICKBIRD, ANNO 2003. SI PUÒ OSSERVARE CHE I GHEBI MAGGIORI PERSISTONO NEL TEMPO. ....	11
FIGURA 1.4 - RIPRESA AEREA 1955(A) DI UNA PORZIONE DELLA BARENA LUNGO IL CANALE DI SAN FELICE CONFRONTATA CON L’ACQUISIZIONE PANCRONMICA DEL SATELLITE QUICKBIRD (B), ANNO 2003.....	12
FIGURA 1.5 - ALTERNANZA DI FASCE DI VEGETAZIONE DOMINATE DA LIMONIUM NARBONENSE E SARCOCORNIA FRUCTICOSA.....	13
FIGURA 1.6 - FREQUENZE DI PRESENZA DELLE DIVERSE SPECIE CON LA QUOTA. ....	17
FIGURA 1.7 – INTERVALLI DI QUOTA PER OGNI SPECIE NEI DIVERSI SITI DI CAMPIONAMENTO.....	17
FIGURA 2.1 - ESEMPIO DI IMMAGINE USATA PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE PERCENTUALI DI COPERTURA DEI DIVERSI ENDMEMBER. ....	26
FIGURA 3.1 - FOTO DIGITALI DI UN'AREA DI CLASSE “LIMONIUM”, RIPRESE A FEBBRAIO E LUGLIO 2003. ....	36
FIGURA 3.2 - VALORI MEDI DI RIFLETTANZA, NELL'INTERVALLO SPETTRALE INDAGATO DAL SENSORE QUICKBIRD, REGISTRATI IN CAMPO PER LE CLASSI “LIMONIUM”, “SARCOCORNIA” E “SPARTINA” NEL MESE DI FEBBRAIO 2003. ....	38
FIGURA 3.3 - VALORI MEDI DI RIFLETTANZA, NELL'INTERVALLO SPETTRALE INDAGATO DAL SENSORE QUICKBIRD, REGISTRATI IN CAMPO PER LE CLASSI “LIMONIUM”, “SARCOCORNIA” E “SPARTINA” NEL MESE DI LUGLIO 2003.....	38

FIGURA 4.1 - RISULTATI DELLA CLASSIFICAZIONE CON ALGORITMI SAM E ML PER L'IMMAGINE DI MAGGIO 2002.....	43
FIGURA 4.2 - RISULTATI DELLA CLASSIFICAZIONE CON ALGORITMI SAM E ML PER L'IMMAGINE DI FEBBRAIO 2003. ....	44
FIGURA 4.3 - RISULTATI DELLA CLASSIFICAZIONE CON ALGORITMI SAM E ML PER L'IMMAGINE DI LUGLIO 2003. ....	45
FIGURA 4.4 - RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO SAM ALL'IMMAGINE INTERA (SINISTRA) E SOLO ALL'AREA DELLA BARENA "TROMBETTA". I CERCHI BIANCHI EVIDENZIANO ALCUNE ZONE DOVE È CHIARAMENTE MIGLIORATA LA CLASSIFICAZIONE (SI RIDUCE L'ERRATA ATTRIBUZIONE ALLE CLASSI "SPARTINA" E "SARCOCORNIA").....	46
FIGURA 4.5 - RISULTATI DELLA CLASSIFICAZIONE CON ALGORITMI SAM E ML PER L'IMMAGINE DI OTTOBRE 2003.....	47
FIGURA 4.6 – FIRME SPETTRALI DELLE PRINCIPALI ALOFITE PRESENTI IN LAGUNA DI VENEZIAI OTTENUTE DALLE DIVERSE ACQUISIZIONI DEL SENSORE QUICKBIRD. ....	48
FIGURA 4.7 - DIFFERENZE DI RIFLETTANZA STAGIONALE (LI-FM=DIFFERENZA DI RIFLETTANZA DELLA CLASSE "LIMONIUM" TRA FEBBRAIO E MAGGIO, LI-ML= DIFFERENZA DI RIFLETTANZA DELLA CLASSE "LIMONIUM"TRA MAGGIO E LUGLIO, LI-FL= DIFFERENZA DI RIFLETTANZA DELLA CLASSE "LIMONIUM"TRA FEBBRAIO E LUGLIO), E TRA CLASSI (L-LISP= DIFFERENZA DI RIFLETTANZA, NELL'IMMAGINE DI LUGLIO, TRA LE CLASSI "LIMONIUM" E "SPARTINA", L-LISA= DIFFERENZA DI RIFLETTANZA, NELL'IMMAGINE DI LUGLIO, TRA LE CLASSI "LIMONIUM" E SARCOCORNIA, L-LIJU=DIFFERENZA DI RIFLETTANZA, NELL'IMMAGINE DI LUGLIO, TRA LE CLASSI "LIMONIUM" E "GIUNCO").....	49
FIGURA 4.8 - CLASSIFICAZIONE MULTI-TEMPORALE E MATRICE DI CONFUSIONE.....	50
FIGURA 4.9 E 4.10 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DEI PIXEL:IMMAGINE PANCROMATICA FEBBRAIO 2003 E MAGGIO 2002.....	51
FIGURA 4.11 E 4.12 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DEI PIXEL:IMMAGINE PANCROMATICA LUGLIO ED OTTOBRE 2003. ....	51
FIGURA 4.13 - INDIVIDUAZIONE DELLE AREE DI ACQUA SUOLO E VEGETAZIONE TRAMITE LA SEGMENTAZIONE DELL'IMMAGINE PANCROMATICA DI MAGGIO 2002.....	52

FIGURA 4.14 - CLASSIFICAZIONE MULTI-TEMPORALE DELLE 4 IMMAGINI PANCROMATICHE.....	53
FIGURA 4.15 - RISULTATO DELLA CLASSIFICAZIONE DELL'IMMAGINE ROSIS, ACCURATEZZA TOTALE 78.5%, COEFFICIENTE K 0.7.....	56
FIGURA 4.16 - RISULTATO DELLA CLASSIFICAZIONE DELL'IMMAGINE CASI, ACCURATEZZA TOTALE 87.7%, COEFFICIENTE K 0.83.....	56
FIGURA 4.17 - DEVIAZIONE STANDARD DELLE AREE DI RIFERIMENTO SOVRAPPOSTE ALL'IMMAGINE DI FEBBRAIO 2003 E MAGGIO 2002.....	57
FIGURA 5.1 – DIVERSO COMPORTAMENTO SPETTRALE DELLE CLASSI “ACQUA” “SUOLO” E “VEGETAZIONE” RISCONTRATO DAL SENSORE MULTISPETTRALE QUICKBIRD NELLE 4 ACQUISIZIONI EFFETTUATE. I VALORI DI RIFLETTANZA NELLE 4 BANDE DI OGNI IMMAGINE SI SONO RICAVALI A PARTIRE DALLE ROI SOVRAPPOSTE.....	60
FIGURA 5.2 - ESEMPIO DI MATRICE DEI CAMBIAMENTI, DA <a href="http://www.csc.noaa.gov">HTTP://WWW.CSC.NOAA.GOV</a> .....	65
FIGURA 5.3 - CORRELAZIONE IN BANDA 4 E DIFFERENZA DI MAREA. ....	67
FIGURA 5.4 - COMPOSIZIONE RGB DELLE BANDE DELL'INFRAROSSO VICINO DELLE IMMAGINI DI FEBBRAIO 2003, MAGGIO 2002 E LUGLIO 2003 .....	68
FIGURA 5.5 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI NDVI NELLE 4 IMMAGINI QUICKBIRD, I VALORI INFERIORI A ZERO, CORRISPONDENTI AI PIXEL D'ACQUA, SONO STATI MASCHERATI.....	69
FIGURA 5.6 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI NDVI NELLE AREE APPARTENENTI ALLE DIVERSE ALOFITE: FEBBRAIO 2003.....	70
FIGURA 5.7 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI NDVI NELLE AREE APPARTENENTI ALLE DIVERSE ALOFITE: MAGGIO 2002. ....	70
FIGURA 5.8 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI NDVI NELLE AREE APPARTENENTI ALLE DIVERSE ALOFITE: LUGLIO 2003.....	71
FIGURA 5.9 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DI NDVI NELLE AREE APPARTENENTI ALLE DIVERSE ALOFITE: OTTOBRE 2003. ....	71
FIGURA 5.10 - DIFFERENZE STAGIONALI PER LE 4 CLASSI DI ALOFITE (LI= “LIMONIUM”, SA= “SARCOCORNIA”, SP= “SPARTINA”, JU= “GIUNCO”	

RISPETTO I VALORI NDVI (MAGGIO MENO FEBBRAIO, LUGLIO MENO MAGGIO, LUGLIO MENO FEBBRAIO).....	72
FIGURA 5.11 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI OTTENUTI DALLA DIFFERENZA TRA RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DELL'INDICE NDVI.	73
FIGURA 5.12 - DISTRIBUZIONE DEI VALORI DEI PIXEL APPARTENENTI A GHEBI E CANALI .....	74
FIGURA 5.13 - RISULTATI DELLA DIFFERENZA TRA LUGLIO E FEBBRAIO.. .....	74
FIGURA 5.14 - RISULTATI DELLA DIFFERENZA TRA MAGGIO E FEBBRAIO. ....	74
FIGURA 5.15 – RISULTATI DELLA DIFFERENZA TRA LUGLIO E MAGGIO.	75
FIGURA 5.16 - PERCENTUALE DI PIXEL CAMBIATI. ....	75
FIGURA 5.17 - RISULTATI DELLE CLASSIFICAZIONE DI “ACQUA” (BLU) “SUOLO” (VERDE) “VEGETAZIONE” (ROSSO) NELLE TRE ACQUISIZIONI DI FEBBRAIO 2003, MAGGIO 2002, LUGLIO 2003.....	76
FIGURA 5.18 - PERCENTUALE COPERTURA DELLE CLASSI “ACQUA” (A), “SUOLO” (S) E “VEGETAZIONE” (V).....	77
FIGURA 6.1 – DIVERSO VALORE DI ED A PARITÀ DI AREA DEI PATCH ...	82
FIGURA 6.2 – ESEMPI DI SCENE CON AREA TOTALE E DELLE SINGOLE CLASSI UGUALE MA DIVERSO IJI .....	83
FIGURA 6.3 - NUMERO DI CLUSTER INDIVIDUATI PER LE CLASSI “ACQUA”, “SUOLO” E “VEGETAZIONE” .....	86
FIGURA 6.4 - AREA MEDIA DELLE CLASSI “ACQUA”, “SUOLO” E “VEGETAZIONE”. ....	86
FIGURA 6.5 – VALORI DI ED PER LE CLASSI “ACQUA” (A), “SUOLO” (S) E “VEGETAZIONE” (V) NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE.....	87
FIGURA 6.6 – RAPPORTO AREA PERIMETRO DELLA CLASSE “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. ....	89
FIGURA 6.7 – VALORI DI IJI PER LE TRE SCENE CLASSIFICATE. ....	89
FIGURA 6.8 – VALORI DI IJI PER LE CLASSI “ACQUA”, “SUOLO” E “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. ....	90

FIGURA 6.9 DISTRIBUZIONE DEI CLUSTER SECONDO LA DIMENSIONE, INDICATA IN PIXEL (2.8 M DI LATO). .....	91
FIGURA 6.10 – MOMENTO PRIMO IN X E Y, CALCOLATO PER OGNI PATCH DI “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. LE COORDINATE X E Y SONO RIFERITE ALLA POSIZIONE DEL PIXEL NELL'IMMAGINE. ....	91
FIGURA 6.11 – MOMENTO SECONDO IN X E Y CALCOLATO PER OGNI PATCH DI “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. ....	92
FIGURA 6.12 – MOMENTO TERZO IN X E Y CALCOLATO PER OGNI PATCH DI “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. ....	92
FIGURA 6.13 – MOMENTO QUARTO IN X E Y CALCOLATO PER OGNI PATCH DI “VEGETAZIONE” NELLE TRE DATE DI ACQUISIZIONE. ....	93
FIGURA 7.1 – FASI IN CUI È STATO SUDDIVISO IL LAVORO DI DEFINIZIONE DEI CAMBIAMENTI NELLA BARENA DI SAN FELICE.....	98

## ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1.I – TABELLA RIASSUNTIVA DEI VALORI DI QUOTA MEDIA DELLE DIVERSE ALOFITE NEI 6 SITI DI CAMPIONAMENTO. L'INDICAZIONE “PAGLIAGA” RIASSUME I SITI “TROMBETTA” E “PASSARINI” .....	18
TABELLA 2.I - CARATTERISTICHE E POSSIBILI APPLICAZIONI DELLE BANDE DEL SENSORE QUICKBIRD.....	21
TABELLA 2.II - CARATTERISTICHE DEL SENSORE ROSIS.....	21
TABELLA 2.III - CARATTERISTICHE DEL SENSORE CASI.....	22
TABELLA 3.I - ESEMPIO DI MATRICE DI CONFUSIONE. ....	32
TABELLA 3.II - ESEMPI DI TABELLE DESCRITTIVE DEI DATI RACCOLTI IN CAMPO. ....	35
TABELLA 4.I - PERCENTUALI DI PIXEL DIFFERENTEMENTE CLASSIFICATI PARTENDO DA ROI DI TRAINING DIVERSE ED USANDO UN DIVERSO ALGORITMO DI CLASSIFICAZIONE.....	42
TABELLA 5.I - DIFFERENZE DI CORRELAZIONE TRA LE BANDE DELL'INFRAROSSO VICINO (F4 = BANDA 4 IMMAGINE DI FEBBRAIO 2003, M4 = BANDA 4 IMMAGINE DI MAGGIO 2002, L4 = BANDA 4 IMMAGINE DI LUGLIO 2003, O4 = BANDA 4 IMMAGINE DI OTTOBRE 2003) NELLE IMMAGINI CON E SENZA MASCHERA PER I PIXEL RAPPRESENTANTI LE AREE DI “ACQUA” .....	67
TABELLA 5.II - MEDIA E DEVIAZIONE STANDARD DEI VALORI DI NDVI CALCOLATI NELLE ROI DI RIFERIMENTO PER LE ALOFITE.....	71
TABELLA 5.III (A, B, C) - PASSAGGI IN PERCENTUALE DA UNA CLASSE (V = “VEGETAZIONE”, A = “ACQUA”, S = “SUOLO”) ALL’ALTRA. ....	77

TABELLA 6.I – VALORI DI ED NELLE TRE DATE PER LE CLASSI “ACQUA”,  
“SUOLO” E “VEGETAZIONE”. ..... 87

TABELLA 6.II – RELAZIONE AREA PERIMETRO PER NASTRI DI DIVERSA  
LARGHEZZA. .... 88

TABELLA 6.III – PERCENTUALI DI PRESENZA DI CLUSTER DI  
“VEGETAZIONE” DI GRANDI DIMENSIONI NEI QUATTRO QUADRANTI  
DEL GRAFICO IN FIGURA 6.13, PER OGNI STAGIONE..... 93

TABELLA 6.IV – AREA DEI TRE CLUSTER DI VEGETAZIONE MAGGIORI  
NELLE TRE ACQUISIZIONI. .... 94

TABELLA 6.V – MOMENTI IN X E Y DEI TRE CLUSTER DI VEGETAZIONE  
MAGGIORI NELLE TRE ACQUISIZIONI..... 94