

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof.ssa Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN

GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**CLASSIFICAZIONE DI SUOLI NUDI E LORO
TESSITURA IN UN'AREA AGRICOLA DELLA
LOMBARDIA ATTRAVERSO DATI
TELERILEVATI**

Relatore: Prof. Leonardo Piccinini

Correlatore esterno: Prof. Andrea Taramelli

Laureando: Fabio Guadagnano

ANNO ACCADEMICO 2015/2016

RIASSUNTO

Il principale obiettivo dell'attività di ricerca proposta nella presente tesi consiste nell'apportare un contributo alla definizione di un parametro utile per calcolare la capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee, ovvero la tessitura dei suoli nudi, proprietà fisica che si relaziona con vari modelli di vulnerabilità degli acquiferi. L'utilizzo di sensori ottici multispettrali ha permesso di caratterizzare la copertura dei suoli in un'area agricola della Lombardia e discretizzare la tessitura dei suoli nudi, esaminando come questa varia nel tempo, in considerazione dei cicli di semina delle colture e delle condizioni climatiche al momento dell'acquisizione dell'immagine satellitare. Il metodo di elaborazione dei dati telerilevati utilizzato in questa tesi si basa sulla Linear Spectral Mixture Analysis (LSMA) e su una campagna radiometrica che ha previsto la collezione di una serie di firme spettrali in situ per confrontare le risposte spettrali dei target di campo con quelle relative ai pixel delle immagini. La LSMA è una tecnica che consente la caratterizzazione quantitativa delle abbondanze delle coperture costituenti la scena identificata al livello sub-pixel. Mediante l'uso di un albero delle decisioni, strumento basato su nodi di tipo "maggiore/minore" rispetto a dei precisi valori limite, è stato possibile classificare le coperture presenti. L'utilizzo delle cartografie dei suoli hanno fornito la base conoscitiva delle tessiture, descrivendo la distribuzione spaziale e la caratterizzazione pedologica dei suoli. L'analisi statistica delle informazioni pedologiche con i prodotti EO ha permesso di correlare le abbondanze di ogni tipologia di suolo individuata e le riflettanze ottenute dal dato ottico con le tessiture ricavate dalla consultazione delle carte pedologiche, per constatare se una specifica abbondanza o riflettanza sia descrittiva di una o più classi tessiturali. La possibilità di osservare la variabilità nello spazio e nel tempo della classe di suolo nudo permette di capire a cosa siano dovute tali variazioni. Infine, l'aggiornamento del tipo di suolo, delle caratteristiche e delle condizioni in cui esso si trova con una buona risoluzione temporale potrebbe concorrere all'aumento della significatività del dato utile alla descrizione della capacità protettiva dei suoli.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to make a contribution for the description of a parameter necessary to assess the soil protective capacity, the soil texture: this physical property is essential in various groundwater vulnerability models. Through the use of Landsat satellite (optical multispectral sensor), it was possible to characterize the land cover in an agricultural area of the Lombardy Region, examining soil texture and how these change in the time, in relation to climatic conditions and planting cycles of crops at the time of satellite acquisition. The Landsat data processing relies on Linear Spectral Mixture Analysis (LSMA) and radiometric campaign to collection in situ spectral signatures, useful to compare the field spectral signatures to spectral responses of the satellite image. This technique allows the quantitative characterization of the endmembers abundances identified in the sub-pixel level and, through the decision tree, tool based on nodes "higher/lower" than specific thresholds, it was possible to classify each pixel and produce bare soil maps. The use of pedological maps provided the soil texture information in the study area, describing the spatial distribution and characterization of soils. The integration of pedological information to EO products, through a statistical analysis, it allowed to correlate the bare soil abundances, the reflectance data and soil texture classes, to see if a specific abundance or reflectance is descriptive of one or more textural classes. The possibility to observe the spatial variability of bare soil classes in the time, allows to understand what are the causes that determine these changes. Finally, the updating of soil types, characteristics and condition in which terrain is located, with good temporal resolution, could increase the data significance, useful to describe the soil protective capacity.

INDICE DEI CONTENUTI

INDICE DEI CONTENUTI	1
LISTA DEGLI ACRONIMI.....	3
LISTA DELLE FIGURE.....	7
LISTA DELLE TABELLE.....	11
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE.....	13
1.1. INTRODUZIONE	13
1.2. STATO DELL'ARTE	20
1.2.1. Funzione ed importanza della risorsa suolo	20
1.2.2. Capacità protettiva dei suoli.....	22
1.2.3. Contributo del telerilevamento nella mappatura dei suoli	24
1.2.4. Metodi di valutazione della vulnerabilità.....	26
1.2.5. Le Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN).....	30
CAPITOLO 2 - DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO	33
2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TERRITORIALE	33
2.1.1. Comprensori di bonifica e di irrigazione	34
2.2. IDROGRAFIA	36
2.2.1. Bacino idrografico principale	36
2.2.2. Reticolo idrografico superficiale.....	37
2.2.3. Fascia delle Risorgive: i Fontanili	39
2.3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	40
2.3.1. Inquadramento geologico	40
2.3.2. Inquadramento geomorfologico.....	43
2.4. STRATIGRAFIA	46
2.5. CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE GENERALI.....	51
CAPITOLO 3 - MATERIALI.....	59
3.1. IMMAGINI SATELLITARI LANDSAT	59
3.1.1. Cenni sul telerilevamento	59
3.1.2. Missione Landsat (Land Satellite Mission)	62
3.2. RADIOMETRIA DI CAMPO (FIRME SPETTRALI IN SITU)	67

3.3.	DUSAF 4.0	70
3.4.	CARTE PEDOLOGICHE (BASI INFORMATIVE DEI SUOLI)	72
3.5.	DATI METEO-CLIMATICI	77
3.6.	CENSIMENTO AGRICOLTURA (DATI ISTAT).....	78
CAPITOLO 4 - METODO DI ELABORAZIONE DEL DATO OTTICO ...		81
4.1.	PRE-PROCESSAMENTO DEI DATI TELERILEVATI	83
4.1.1.	Calibrazione radiometrica del sensore.....	83
4.2.	CREAZIONE DI UNA MASCHERA (MASKING).....	84
4.2.1.	Mappatura delle coperture antropiche	85
4.3.	CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI	86
4.3.1.	Linear Spectral Mixture Model (LSMM).....	89
4.3.2.	Principal Component Analysis (PCA).....	90
4.3.3.	Selezione degli endmembers	91
4.3.4.	Albero delle decisioni.....	93
4.4.	ANALISI STATISTICA DELLE CLASSIFICAZIONI DI TESSITURE DEI SUOLI.....	95
4.4.1.	Box Plot e Violin Plot	97
CAPITOLO 5 - RISULTATI E DISCUSSIONI.....		99
5.1.	RISULTATI.....	99
5.1.1.	Analisi dei dati pluviometrici	99
5.1.2.	Classificazione delle aree a copertura antropica.....	103
5.1.3.	Classificazione delle tessiture dei suoli sulla base delle carte pedologiche.	104
5.1.4.	Classificazione dei suoli nudi.....	106
5.1.5.	Radiometria di campo	119
5.1.6.	Classificazione dei suoli nudi sulla base dell'analisi statistica.....	121
5.2.	DISCUSSIONI.....	129
CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI.....		135
BIBLIOGRAFIA.....		137
SITOGRAFIA.....		159
RINGRAZIAMENTI.....		161
APPENDICE.....		163

LISTA DEGLI ACRONIMI

ARPA	<i>Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente</i>
AS	<i>ASsociazioni di suoli</i>
BIC	<i>Bilancio IdroClimatico</i>
CBPA	<i>Codice di Buona Pratica Agricola</i>
CEE	<i>Comunità Economica Europea</i>
CN	<i>CoNsociazioni di suoli</i>
CNR	<i>Centro Nazionale Ricerche</i>
CO	<i>COmplessi di suoli</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
D.Lgs	<i>Decreto Legislativo</i>
D.M.	<i>Decreto Ministeriale</i>
DN	<i>Digital Number</i>
DT	<i>Decision Tree</i>
DUSAF	<i>Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali</i>
EM	<i>EndMember</i>
ENVI	<i>ENvironment for Visualizing Images</i>
EO	<i>Earth Observation</i>
Ep	<i>Evapotraspirazione potenziale</i>
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
ERSAF	<i>Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>

ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus instrument</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GNDCI	<i>Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche</i>
ha	<i>Ettari (di superficie)</i>
INEA	<i>Istituto Nazionale di Economia Agraria</i>
ISPRA	<i>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</i>
ISTAT	<i>Istituto Nazionale di Statistica</i>
L1T	<i>Level 1 Terrain corrected product</i>
L7	<i>Landsat 7 satellite</i>
L8	<i>Landsat 8 satellite</i>
LFdP	<i>Livello Fondamentale della Pianura</i>
LSMA	<i>Linear Spectral Mixture Analysis</i>
LSMM	<i>Linear Spectral Mixture Model</i>
LSU	<i>Linear Spectral Unmixing</i>
MA	<i>Milioni di Anni</i>
MIPAAF	<i>Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali</i>
MW	<i>MicroWave (microonde)</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIR	<i>Near InfraRed spectral band</i>
NPV	<i>Non-Photosynthetic Vegetation</i>
OLI	<i>Operational Land Imager instrument</i>
PCA	<i>Principal Components Analysis</i>

PCs	<i>Principal Components</i>
POPLEX	<i>PO PLain EXperiment</i>
POR	<i>Programma Operativo Regionale della Regione Lombardia</i>
RM	<i>Remote Sensing</i>
ROI	<i>Region Of Interest</i>
SAU	<i>Superficie Agricola Utilizzata</i>
SEGUICI	<i>Smart tEcnologie per la Gestione delle risorse idriche ad Uso Irriguo e Civile</i>
SLC-off	<i>Scan Line Corrector off</i>
TIR	<i>Thermal InfraRed spectral band</i>
UC	<i>Unità Cartografata (pedologia)</i>
URBIM	<i>Unione Regionale Bonifiche Irrigazioni e Miglioramenti fondiari della Lombardia</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>Unites States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transverse of Mercator</i>
VIS	<i>VISible spectral band</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>
WofE	<i>Weights of Evidence</i>
WRS	<i>Worldwide Reference System</i>
ZVN	<i>Zone Vulnerabili ai Nitrati</i>

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1. Diagramma di flusso delle fasi di studio.	19
Figura 2. Carta della capacità protettiva dei suoli della Pianura Lombarda	24
Figura 3. Mappa delle zone vulnerabili ai nitrati in Italia.....	31
Figura 4. Localizzazione dell'area di studio	33
Figura 5. Comprensori di bonifica e irrigazione della Regione Lombardia.	35
Figura 6. Sistemi di irrigazione adottati a livello regionale	36
Figura 7. Bacino idrografico del fiume Po.....	37
Figura 8. Idrografia principale e localizzazione dei fontanili attivi nell'area di studio. ...	38
Figura 9. Fascia delle Risorgive	40
Figura 10. Assetto strutturale della Pianura Padana	41
Figura 11. Rappresentazione della Pianura Padana nel Pliocene e durante l'ultima fase glaciale würmiana	42
Figura 12. Geomorfologia semplificata della Pianura Lombarda.....	45
Figura 13. Schema geologico delle unità che costituiscono la Pianura Padana.....	48
Figura 14. Geologia semplificata della Pianura Lombarda.....	49
Figura 15. Sezione del sottosuolo della Pianura Lodigiana	50
Figura 16. Rappresentazione schematica dei rapporti stratigrafici delle principali unità idrogeologiche del sottosuolo padano	53
Figura 17. Sezioni idrostratigrafiche che mostrano la stratigrafia del Bacino Padano	56
Figura 18. Quadro stratigrafico complessivo e classificazione dei Gruppi Acquiferi della Pianura Padana	57
Figura 19. Spettro elettromagnetico e specifiche delle bande spettrali.....	60
Figura 20. Firme spettrali di alcuni elementi naturali presenti sulla superficie terrestre e del suolo a differenti contenuti idrici	61
Figura 21. Satelliti Landsat lanciati a partire dal 1972 e loro orbite.....	63
Figura 22. Schematizzazione delle bande spettrali dei sensori OLI e TIRS del satellite Landsat-8 e del sensore ETM+ del satellite Landsat-7	64

Figura 23. Confronto delle differenti dimensioni delle immagini L7 e L8	65
Figura 24. Localizzazione dei target della campagna radiometrica.	68
Figura 25. Foto dei target di suolo nudo misurati durante la campagna di acquisizione delle firme spettrali.....	69
Figura 26. Carta della Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali della Regione Lombardia (DUSAF 4.0).....	72
Figura 27. Triangolo USDA per la determinazione della classe tessiturale.	73
Figura 28. Classi tessiturali fondamentali e relativi raggruppamenti.....	75
Figura 29. Layout delle due tipologie di carte pedologiche utilizzate.....	76
Figura 30. Rete meteorologica di ARPA Lombardia: stazioni termo-pluvio-nivometriche all'intero territorio regionale.....	77
Figura 31. Censimento agricoltura: superficie occupata a cereali e superficie agricola utilizzata per comune.....	79
Figura 32. Diagramma di flusso dei passaggi seguiti per l'elaborazione.....	82
Figura 33. Maschera utilizzata per delimitare l'area di studio da includere nelle fasi di processamento	85
Figura 34. Scomposizione di un pixel con la LSMA	88
Figura 35. PC Eigenvalues plot.....	91
Figura 36. Density-shaded 2D scatterplot	92
Figura 37. Landsat mixing space e spettri degli EM primari	93
Figura 38. Albero delle decisioni per realizzare le mappe dei suoli nudi	94
Figura 39. Schematizzazione di un Box Plot.....	97
Figura 40. Mappa della copertura di tipo antropico (DUSAF).....	103
Figura 41. Discretizzazione dell'area di studio	104
Figura 42. Percentuali delle diverse tessiture riscontrate dalla consultazione della carta pedologica di riconoscimento 1:250.000 nell'area di studio	105
Figura 43. Percentuali delle diverse tessiture riscontrate dalla consultazione della carta pedologica di semidettaglio 1:50.000 nell'area di studio	105
Figura 44. Immagini mascherate L7 in falsi colori (visualizzazione 4-3-2 RGB)	107

Figura 45. Immagini mascherate L8 in falsi colori (visualizzazione 4-3-2 RGB).....	108
Figura 46. Visualizzazione in falsi colori 7-4-2 RGB dell'immagine L8 e relativo dettaglio.....	109
Figura 47. Density-shaded scattergrams ed Endmember reflectance spectra	110
Figura 48. Mappe classificate delle coperture delle immagini L7	111
Figura 49. Mappe classificate delle coperture delle immagini L8.....	112
Figura 50. Esempio di dettaglio della cover map (immagine L7 del 25 aprile 2012).....	113
Figura 51. Esempio di dettaglio della cover map (immagine L8 del 01 aprile 2015).....	114
Figura 52. Mappe delle coperture derivanti dall'immagine mascherata con la classe substrato.	115
Figura 53. Endmember reflectance spectra dei suoli nudi e vegetazione secca.....	116
Figura 54. Esempio di dettaglio della mappa classificata dei suoli nudi	117
Figura 55. Mappa della copertura della classe suoli nudi	118
Figura 56. Endmember reflectance spectra della classe suolo da dato Landsat L7	120
Figura 57. Confronto tra le firme di campo e le risposte spettrali telerilevate.....	120
Figura 58. Box/Whiskers Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 e del suolo 2 in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000	122
Figura 59. Violin Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 e del suolo 2, in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000	123
Figura 60. Box/Whiskers Plots e Violin Plots dell'acquisizione più rappresentativa (12 marzo 2012): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle riflettanze relazionate con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000.....	125
Figura 61. Box/Whiskers Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 e del suolo 2, in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.	126
Figura 62. Violin Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 e del suolo 2, in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.	127
Figura 63. Box/Whiskers Plots e Violin Plots dell'acquisizione più rappresentativa (12 marzo 2012): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle riflettanze relazionate con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.....	128

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1. Modello di valutazione della capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee.....	23
Tabella 2. Confronto delle specifiche tecniche delle bande spettrali del sensore ETM+ e della strumentazione OLI/TIRS	64
Tabella 3. Dettaglio delle immagini satellitari utilizzate.	66
Tabella 4. Specifiche tecniche delle bande considerate nell'analisi	67
Tabella 5. Dettaglio dei punti di campionamento.	69
Tabella 6. Valori delle soglie utilizzate nell'elaborazione.....	95
Tabella 7. Tessiture e relativi codici utilizzati nell'analisi	96
Tabella 8. Valori di temperatura media mensile, evapotraspirazione potenziale mensile, precipitazione cumulata mensile e bilancio idro-climatico mensile	101
Tabella 9. Bilancio idrico relativo (pioggia utile).....	102
Tabella 10. Classi tessiturali rilevate dalla consultazione delle carte pedologiche.....	104
Tabella 11. Descrizione e soglie di contenuto delle “terre fini” (diametro < 2 mm) delle tessiture fondamentali individuate nell'area di studio.....	106
Tabella 12. Statistiche riguardanti la distribuzione spaziale della copertura complessiva dei suoli nudi.	119

Capitolo 1

INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

1.1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della gestione delle risorse idriche attraverso lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche volte all'ottimizzazione dell'impiego dell'acqua ad uso irriguo e civile, trovano ampia applicazione i prodotti Earth Observation (EO). La crescente esigenza di acquisire informazioni di buona qualità in tempi rapidi, unitamente alla necessità di disporre di strumenti e di tecniche innovative per l'analisi del territorio, hanno motivato la comunità scientifica a sviluppare nuovi approcci metodologici per approfondire lo studio delle proprietà fisiche, chimiche e mineralogiche del suolo.

L'area di studio si colloca nella Regione Lombardia, in un territorio a predominante uso agricolo, a S-SE dal Comune di Milano, coinvolgendo diverse province lombarde, tra cui totalmente quella di Lodi e parzialmente quelle di Milano, Pavia, Bergamo e Cremona.

Un tema divenuto importante negli ultimi decenni è quello del rischio di contaminazione degli acquiferi legato alle attività antropiche (di tipo agricolo, civile e/o industriale). Le acque sotterranee rappresentano la risorsa principale di acqua dolce necessaria a soddisfare le richieste idropotabili della popolazione, generalmente di migliore qualità rispetto a quelle superficiali, in quanto meno esposte a fenomeni di contaminazione, e talvolta utilizzate anche senza aver subito alcun trattamento (EEA, 2005; Matiatos, 2016). In Italia, circa l'85% del prelievo nazionale di acqua ad uso potabile è proveniente dalle risorse idriche sotterranee (Onorati et al., 2006; ISTAT, 2012), perciò la protezione delle falde acquifere è di cruciale importanza.

I composti azotati, ed in particolare i nitrati (NO_3^-), sono tra i contaminanti diffusi (detti anche *Non-Point*) che si rinvencono più frequentemente negli acquiferi dei paesi industrializzati e in via di sviluppo (Galloway et al., 2008; Rivett et al., 2008; Wick et al., 2010). A causa della loro elevata mobilità, risultano molto

suscettibili al dilavamento e per questo motivo possono facilmente raggiungere le acque sotterranee, determinando fenomeni di inquinamento (Nolan et al., 2002; Vitousek et al., 2002). Tale forma inorganica dell'azoto è un nutriente essenziale per le piante e per il sostentamento di tutti gli ecosistemi, naturalmente presente nei suoli e nelle acque, la cui formazione è parte integrante del ciclo dell'azoto (Self & Waskom, 2013). Tuttavia, una loro presenza in concentrazioni estremamente elevate indica spesso una contaminazione esterna e, di conseguenza, una degradazione qualitativa delle acque fino a rendere inutilizzabile la risorsa idrica per l'uso idropotabile (Padovani & Trevisan, 2002; Capri et al., 2009). La concentrazione naturale di nitrati nelle acque sotterranee è di alcuni milligrammi per litro, in relazione al tipo di suolo e alle caratteristiche geologiche dell'area (Boyce et al., 1976; WHO, 2011). Le acque sotterranee delle pianure alluvionali (come ad esempio, la Pianura Padana) sono tipicamente le più impattate da questo tipo di inquinamento (Cinnirella et al., 2005; Mastrocicco et al., 2011; Bartzas et al., 2015; Stevenazzi et al., 2015), dato che la contaminazione di un acquifero è strettamente legata alle caratteristiche pedologiche e litologiche sito-specifiche del territorio (Onorati et al., 2005). Inoltre, le falde superficiali sono più suscettibili alla contaminazione rispetto a quelle profonde (Nolan et al., 2002; Sun & Kopp, 2013).

La vulnerabilità degli acquiferi è legata sia a pressione urbane (Tesoriero & Voss, 1997; Kuroda & Fukushi, 2008) che a pressione agricole (Giuliano et al., 1999; Padovani & Trevisan, 2002; Capri et al., 2009). Sulla base dei recenti studi realizzati nella Pianura Padana e del progetto pilota denominato “*POPLEX*” (Po Plain Experiment), la sorgente di contaminazione urbana (scarichi industriali e rete fognaria civile) è indicata come la maggiore causa di deterioramento della qualità delle acque sotterranee (Masetti et al., 2015; Stevenazzi et al., 2015). Nei lavori di Masetti et al. (2008; 2009) e Sorichetta et al. (2011) è stato dimostrato che la presenza di nitrati nelle falde acquifere è fortemente correlata alla sorgente urbana piuttosto che alle attività agricole e zootecniche (utilizzo di effluenti zootecnici e fertilizzanti azotati).

Il consumo delle acque sotterranee idropotabili con alte concentrazioni di nitrati rappresenta un'importante fonte di rischio per la salute umana e può essere connesso alla manifestazione della cosiddetta *Metaemoglobinemia*, patologia che affligge sensibilmente gli infanti, in grado di interferire con l'ossigenazione del sangue (Sandstedt, 1990; Amdur et al., 1993; Fan & Steinberg, 1996; Carpenter et al., 1998; Wang et al., 2000; Klaassen, 2008; Self & Waskom, 2013). Oltre a ciò, nei soggetti più anziani, l'ingerimento di acque molto ricche in nitrati può contribuire all'aumento del rischio di insorgenza di alcune forme tumorali (Weisenburger, 1990; Weyer et al., 2001).

A partire dagli anni '90 sono state emanate una serie di normative e provvedimenti di carattere ambientale che regolamentano gli apporti di nitrati, al fine di salvaguardare gli ecosistemi e la salute umana. La “*Direttiva Nitrati*” (91/676/CEE), adottata dalla Comunità Economica Europea il 12 dicembre 1991, è il riferimento normativo a livello comunitario per la protezione delle acque dall'inquinamento causato dai nitrati provenienti da fonti agricole. Lo scopo della suddetta norma è quello di prevenire qualsiasi ulteriore inquinamento di questo tipo, riducendo l'apporto di azoto ai suoli e quindi la lisciviazione di tali sostanze nelle acque sotterranee o un loro ruscellamento in quelle superficiali (MIPAAF, 2009; ISPRA, 2015). Recepita in Italia con il D.Lgs. 152/99 (*Disposizioni sulla tutela delle acque da inquinamento*), mira a ridurre la contaminazione delle acque fornendo i criteri, i vincoli e i divieti per la corretta utilizzazione dei fertilizzanti azotati. La normativa, per tal motivo, prevede l'individuazione e la designazione delle aree vulnerabili ai nitrati (*ZVN – Zone Vulnerabili ai Nitrati*). Ripresa successivamente dal D.Lgs 152/2006 e dal D.Lgs. 128/2010, stabilisce i criteri e gli aspetti metodologici per l'individuazione delle ZVN alla percolazione di nitrati di origine agricola.

Gli studi sulla vulnerabilità degli acquiferi sono di cruciale importanza per comprendere la relazione causa-effetto tra la qualità delle acque sotterranee e i fattori naturali/antropici che determinano un'eventuale contaminazione della falda, permettendo così di sviluppare dei piani di protezione efficaci in grado di minimizzare gli impatti sulla qualità delle acque (Stevenazzi et al., 2015).

Individuare dove l'acquifero superficiale è più vulnerabile alla contaminazione e la conoscenza dei fattori che regolano l'insieme dei processi e dei fenomeni che agiscono nel suolo e sul territorio riveste un'importanza strategica per l'elaborazione di politiche di pianificazione territoriale attuate nell'ottica dello sviluppo sostenibile, per la salvaguardia e la protezione delle risorse idriche (Tesoriero & Voss, 1997; Nolan et al., 2002; Arthur et al., 2007; ISPRA, 2015d; Kumar et al., 2015). Pertanto, le carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento sono uno strumento base per la gestione qualitativa e la protezione delle acque sotterranee (Dixon, 2005; Vrba & Zaporozec, 1994; Masetti, 2012; Kumar et al., 2015; Stevenazzi et al., 2015).

Per questo fine, negli ultimi anni, sono stati messi a punto ed utilizzati molteplici sistemi d'elaborazione per la valutazione della vulnerabilità, basati su differenti approcci e parametri essenziali (Meinardi et al., 1995; Gogu & Dassargue, 2000; Bartzas et al., 2015; Kumar et al., 2015). Questi sistemi sono molto diversi, a seconda della fisiografia delle zone per i quali sono stati studiati, delle finalità per cui sono stati sperimentati, del numero e della qualità dei dati disponibili (De Maio et al., 2001).

Secondo quanto riportato nel D.Lgs. 152/2006, Allegato 7 – Parte AII “*Aspetti metodologici*”, nell'individuazione delle ZVN, si deve tener conto delle caratteristiche fisiche ed ambientali delle acque e dei terreni che determinano il comportamento dei nitrati nel sistema acqua/terreno (Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2006). Uno dei fattori (ambientali) che può concorrere a determinare uno stato di contaminazione di un acquifero è quello pedologico, che comprende tutti gli elementi fisico-chimici primari e idraulici, utile a definire la capacità protettiva del suolo (Bottarin & Tappeiner, 2010). La capacità di attenuazione del suolo nei confronti dell'inquinante di degradare, diluire o ritardare la lisciviazione è dipendente da una serie di processi fisici, chimici e biologici (De Maio et al., 2001), quali ad esempio: le caratteristiche di tessitura, il contenuto di sostanza organica ed altri fattori relativi alla sua composizione e reattività chimico-biologica (Civita, 1994; D'Haene et al., 2003; Calzolari et al., 2004; Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2006; de Ruijter et al., 2007;

ERSAF, 2015). La tessitura dei suoli nudi può essere definita come un parametro essenziale per descrivere la capacità protettiva dei suoli, relazionandosi, direttamente e/o indirettamente, con i modelli di vulnerabilità dell'acquifero (Meinardi et al., 1995; Calzolari & Ungaro, 2006).

I metodi attualmente utilizzati per definire la vulnerabilità degli acquiferi a scala regionale (Focazio et al., 2002) possono essere *sogettivi (knowledge-driven)* oppure *oggettivi (data driven)*. I modelli *parametrici (index-based)* rientrano tra quelli sogettivi e, allo stato attuale, sono le tecniche più comunemente utilizzate per valutare la vulnerabilità delle acque sotterranee perché sono relativamente facili da implementare e richiedono una quantità limitata di informazioni di facile reperibilità (Sorichetta, 2010), come i dati climatici, topografici e le proprietà fisiche del suolo (Gogu & Dassargue, 2000). Ne sono un esempio i metodi SINTACS (Civita & De Maio 1997), AVI (Stempvoort et al., 1993), GLA (Hörling et al., 1995), PI (Goldscheider et al., 2000), DRASTIC (Aller et al., 1987), SEEPAGE (Navulur, 1996), EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997) e loro modificazioni (Sener & Davraz 2013). Un problema alla base di questi metodi è l'uso di pesi e di punteggi, la cui assegnazione si basa su dei criteri sogettivi (Aschonitis et al., 2014). Per ovviare ad un eccessivo peso della valutazione sogettiva, è divenuto relativamente frequente l'utilizzo di modelli matematici in scala regionale (Lichtenberg & Shapiro, 1997; Tesoriero & Voss, 1997; Nolan et al., 2002; Worrall & Besien, 2005; Calzolari & Ungaro, 2006).

Nella definizione della vulnerabilità va utilizzato un approccio che, seppure dotato di una relativa semplicità, porti a conseguire risultati scientificamente difendibili (Sorichetta, 2010; Masetti, 2012). A tale proposito, l'uso dei metodi oggettivi (ad es., i modelli statistici) consentono di ottenere dei prodotti finali scientificamente difendibili, con un ragionevole compromesso tra complessità e costi del modello (Focazio et al., 2002). Questi sono da preferire poiché si basano su dati di campo e non su opinioni soggettive, correlando la presenza di un contaminante con fattori naturali e antropici caratterizzanti l'area in esame (*fattori predittivi*; Worrall & Besien, 2005; Masetti et al., 2007; Sorichetta et al., 2013; Stevenazzi et al., 2015). Molti dei suddetti approcci statistici implicano l'uso di metodi deterministici o

stocastici per definire la vulnerabilità di un acquifero, nei quali vengono presi in considerazione anche i fattori che influenzano la lisciviazione del contaminante verso la falda, come la tessitura del suolo (*soil type e/o soil media*) e quindi la capacità protettiva dei suoli (Bartzas et al., 2015).

La presente tesi affronta lo studio di uno dei parametri utili nella descrizione della capacità protettiva dei suoli, la quale si relaziona al grado di vulnerabilità di un acquifero, ovvero la tessitura dei suoli nudi. Mediante l'utilizzo di sensori satellitari passivi, cioè in grado di ricevere e misurare l'intensità con cui è riflessa l'energia elettromagnetica proveniente dal Sole (Gomarasca, 2004), è stato possibile discretizzare la tessitura dei suoli ed esaminare come questa varia nel tempo. I dati ottici multispettrali dei satelliti Landsat-7 e Landsat-8 hanno permesso di caratterizzare la copertura del suolo, di determinarne la variazione e infine di individuare, tenendo conto dei cicli di semina delle colture, i suoli nudi dei quali si intendeva caratterizzare la tessitura, in considerazione delle condizioni climatiche al momento dell'acquisizione dell'immagine.

Le cartografie dei suoli della Regione Lombardia hanno fornito la base informativa sulle diverse classi tessiturali presenti nell'area di studio: sono state consultate le carte pedologiche in scala 1:250.000 (*carta di riconoscimento*) e in scala 1:50.000 (*carta di semidettaglio*), ognuna delle quali contiene la distribuzione spaziale e la caratterizzazione pedologica dei suoli nel territorio di riferimento. Integrando le informazioni pedologiche con i prodotti EO, si è cercato di trovare una correlazione tra l'abbondanza (di ogni tipologia di suolo individuata), la riflettanza (ottenuta dal dato ottico) e la classe tessiturale (derivata dalle carte pedologiche). La tessitura dei suoli nudi può essere interpretata come il proxy per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi legata a pressioni agricole, poiché è direttamente legata alla capacità protettiva dei suoli (Bloemen, 1980; Schuh & Bauder, 1986; Wösten & Van Genuchten, 1988; Vereecken et al., 1990; ERSAF, 2004; Calzolari & Ungaro, 2006). La metodologia utilizzata in questa tesi è schematizzata nel diagramma di flusso in Figura 1.

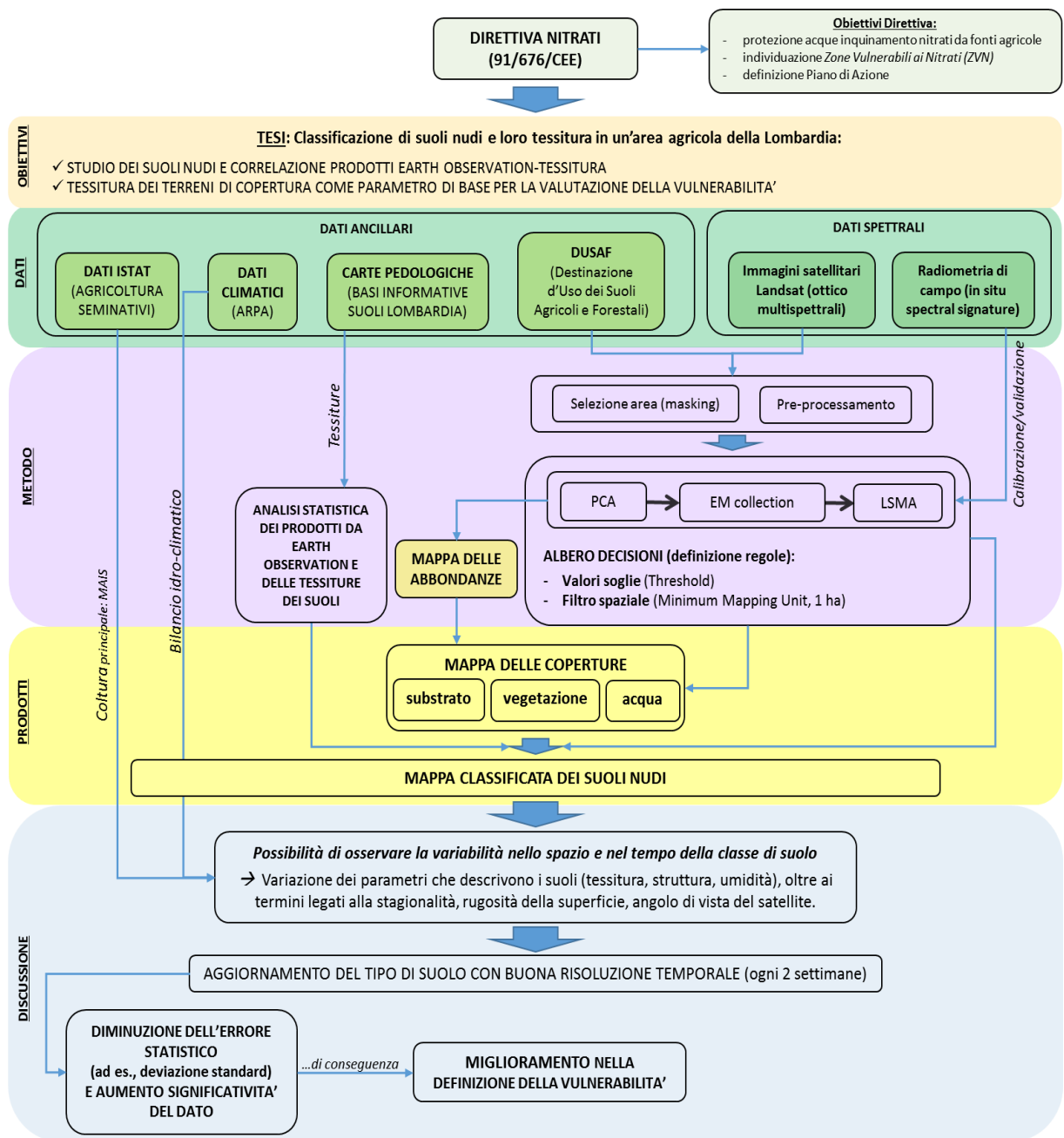


Figura 1. Diagramma di flusso delle fasi di studio.

Il presente elaborato, rappresenta un contributo al lavoro di ricerca svolto all'interno del Progetto SEGUICI (Smart tEcnologie per la Gestione delle risorse idriche ad Uso Irriguo e Civile), nato in risposta all'avviso pubblico per la realizzazione di progetti di ricerca industriale e sviluppo sperimentale nel settore delle smartcities and communities, facente parte del Programma Operativo Regionale (POR) 2007-2013 della Regione Lombardia.

1.2. STATO DELL'ARTE

1.2.1. Funzione ed importanza della risorsa suolo

Il suolo, risorsa naturale non rinnovabile, è un sottile mezzo poroso biologicamente attivo, risultato di complessi e continui fenomeni di interazione tra processi fisici e chimici (Fumanti, 2009; ISPRA, 2015d): è un filtro che contrasta la diffusione degli inquinanti, capace di ridurre le quantità potenzialmente immesse nelle acque sotterranee (Blum, 1993; Bouma, 2001; Blum et al., 2004; Dominati et al., 2010; Munafò et al., 2010; Assennato et al., 2015). Questa capacità di attenuazione dei contaminanti (*capacità protettiva del suolo*) è intesa come la capacità del terreno di limitare il flusso idro-veicolato di inquinanti verso la falda e rappresenta uno degli elementi principali per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi, costituendo il primo ostacolo nei confronti dei potenziali contaminanti (ERSAF, 2004). Il valore protettivo delle coperture pedologiche dipende dalle proprietà fisico-meccaniche del suolo, che determinano un'azione di filtro e di barriera al movimento degli inquinanti, dalle loro proprietà chimico-fisiche, che ne determinano la capacità tamponante, e dall'attività biologica, che consente la decomposizione biochimica e microbiologica delle sostanze immesse nel suolo (APAT, 2008).

La capacità protettiva è ricavabile a partire da alcune proprietà del suolo come la tessitura, la sostanza organica e la densità apparente (D'Haene et al., 2003; Calzolari et al., 2004; Calzolari & Ungaro, 2006; de Ruijter et al., 2007). La *tessitura*, proprietà fisico-meccanica del terreno, è definita dalla distribuzione percentuale (in peso) con cui sono presenti le componenti della terra fine, nelle frazioni granulometriche che la compongono (diametro equivalente $\emptyset \leq 2$ mm, ovvero sabbia, limo ed argilla; Soil Survey Staff, 1993; FAO, 2006). Lo *scheletro* è costituito invece da frammenti grossolani con diametro $\emptyset > 2$ mm, cioè ghiaie, ciottoli e pietre di diversa natura mineralogica, forma e dimensione (FAO, 2006; Soil Survey Staff, 2006; Costantini, 2007). La tessitura svolge una funzione importante nella lisciviazione dei nitrati verso la falda acquifera attraverso i suoli (Oomen, 1995; Ryan, 1998; Sun & Kopp, 2013), permettendo di determinare la

permeabilità dei terreni e l'infiltrazione dei contaminanti verso la falda acquifera (percolazione). Secondo ERSAF (2003), la tessitura dei suoli nudi rappresenta il parametro che più influisce sulla permeabilità. Inoltre, influisce fortemente anche sulle altre proprietà fisiche, ad esempio: struttura, porosità e stabilità degli aggregati (Malet et al., 2003).

A causa della maggiore permeabilità, i terreni grossolani (sabbiosi) tendono a non trattenere l'acqua in eccesso e a favorire il movimento dei nitrati fino alla falda freatica sottostante, divenendo così più esposti e suscettibili alla lisciviazione rispetto ai terreni argillosi (Meinardi et al., 1995; Muchovej & Rechcigl, 1995). Per tale motivo, i corpi idrici sotterranei più inquinati sono localizzati nelle porzioni più permeabili delle pianure alluvionali, caratterizzate da tessiture granulometricamente grossolane (Onorati et al., 2005). Oltre alle proprietà fisiche, la perdita di nitrati per dilavamento dipende dalla concentrazione di NO_3^- nel suolo, dal volume di acqua drenata e dai fattori climatici (Kolenbrander, 1981; Sequi, 1989; Meinardi et al., 1995).

La capacità protettiva di un suolo è una qualità complessa e delicata, che può subire importanti modifiche in tempi anche brevi, in relazione al cosiddetto consumo di suolo (Calzolari & Ungaro, 2006). Per consumo di suolo si intende l'incremento di aree con coperture artificiali legate alle dinamiche insediative in zone urbane e rurali, associato alla condizione di perdita della risorsa suolo (impermeabilizzazione, meglio noto con il termine inglese di *soil sealing*), dovuta all'occupazione e sottrazione della superficie originariamente agricola, naturale o semi-naturale (Munafò et al., 2010b; ISPRA, 2015d). Il soil sealing è causato dalla copertura del suolo con materiali "impermeabili" o comunque dal cambiamento delle caratteristiche del suolo tanto da renderlo impermeabile in modo irreversibile o difficilmente reversibile (Barberis, 2005). Assieme alle scorrette pratiche agricole, zootecniche e forestali, alle dinamiche insediative, alle variazioni d'uso e agli effetti locali dei cambiamenti ambientali globali, il consumo di suolo può originare gravi effetti degradativi che ne limitano o compromettono totalmente la funzionalità (APAT, 2008; Gardi et al., 2013; ISPRA, 2015c).

1.2.2. Capacità protettiva dei suoli

Per la valutazione della capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee, l'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste della Regione Lombardia (ERSAF) ha sviluppato un modello interpretativo basato su metodologie e schemi di valutazione parametrici che considerano le principali caratteristiche dei suoli, correlate con la loro capacità di controllare il trasporto di inquinanti idrosolubili in profondità verso le risorse idriche sotterranee (Brenna et al., 1999; Calzolari & Ungaro, 2006). Il modello, sviluppato per l'individuazione delle ZVN nel quadro del Programma di Tutela e Uso delle Acque della Regione Lombardia, prevede tre classi di capacità protettiva (elevata, moderata e bassa) e si riferisce alla parte di suolo interessata dagli apparati radicali delle piante, per un periodo di tempo sufficiente a permetterne la degradazione (Brenna & Rasio, 2000). Un suolo le cui proprietà determinano una rapida trasmissione di sostanze inquinanti alla falda sottostante viene definito poco protettivo, e l'area su cui questo insiste è definita sensibile, cioè soggetta a cambiamenti delle sue proprietà (Calzolari & Ungaro, 2006). Non è detto, però, che la presenza di un suolo poco protettivo significhi necessariamente rischio di inquinamento, dato che le pratiche di gestione possono ovviare al rischio.

Le caratteristiche considerate nello schema di valutazione di ERSAF (2004), rilevanti ai fini dell'effetto filtrante e protettivo nei confronti delle acque sotterranee e utilizzate come indicatori del potere tampone del suolo (Tabella 1), sono:

- *Permeabilità*: condiziona la percolazione. Suoli con permeabilità bassa contrastano efficacemente il passaggio in profondità degli inquinanti;
- *Granulometria (famiglia tessiturale)*: condiziona la permeabilità e il drenaggio del suolo e quindi la velocità di percolazione in profondità degli inquinanti;
- *Profondità della falda (di endosaturazione)*: è un indicatore di “pericolo”, soprattutto se associata a suoli con percolazione rapida;
- *Indicatori fisico-chimici (pH e Capacità di Scambio Cationico – CSC)*: al di sopra di una soglia limite, si considera che possano contrastare

efficacemente il movimento in profondità dei composti inquinanti e bloccarli nel suolo.

<i>Classi di capacità protettiva</i>	<i>Permeabilità</i>	<i>Profondità falda</i>	<i>Classi granulometriche</i>	<i>Modificatori chimici pH, CSC</i>
<i>Elevata</i>	bassa (Classi 4, 5, 6)	> 100 cm	Fine, Very Fine, Fine Coarse Silty, Loamy, Clayey Skeletal, più tutte le classi fortemente contrastanti comprese quelle over Sandy, Sandy Skeletal e Fragmental in cui il primo termine sia Fine, Very Fine o Fine Silty	pH > 5.5 CSC > 10 (meq/100g)
<i>Moderata</i>	moderata (Classe 3)	50 – 100 cm (con perm. bassa)	Coarse Loamy, Loamy Skeletal, più le rimanenti classi over Sandy, Sandy Skeletal o Fragmental	pH 4.5 – 5.5 CSC tra 5 – 10 (meq/100g)
<i>Bassa</i>	elevata (Classi 1, 2)	< 50 cm (con perm. bassa) < 100 cm (con perm. moderata)	Sandy, Sandy Skeletal, Fragmental, più le classi fortemente contrastanti in cui il primo termine sia Sandy, Sandy Skeletal, Fragmental	pH < 4.5 CSC < 5 (meq/100g)

Tabella 1. Modello di valutazione della capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee (da: ERSAF, 2004).

Le caratteristiche idrauliche dei suoli sono definite tramite l'applicazione di funzioni di pedo-trasferimento (Rawls & Brakensiek, 1989) alle informazioni fisico-chimiche dei suoli (ERSAF, 2009).

La capacità protettiva varia a seconda delle caratteristiche e della distribuzione dei diversi tipi di suoli nella Pianura Lombarda (Figura 2): quelli a bassa capacità protettiva si osservano nelle aree caratterizzate da depositi grossolani ad elevata permeabilità (pianura nord-occidentale, alta pianura, bassa pianura occidentale e nelle valli fluviali). La presenza nei suoli di orizzonti a tessitura medio fine nella pianura centro-orientale, rende i suoli relativamente più protettivi, poiché la più bassa permeabilità dei materiali rende minore la tendenza dei suoli alla percolazione.

Nella bassa pianura centro-orientale e nella piana alluvionale del Po i suoli hanno granulometria fine, pertanto la funzione di protezione delle acque profonde è espressa al meglio (ERSAF, 2004; ERSAF, 2015).

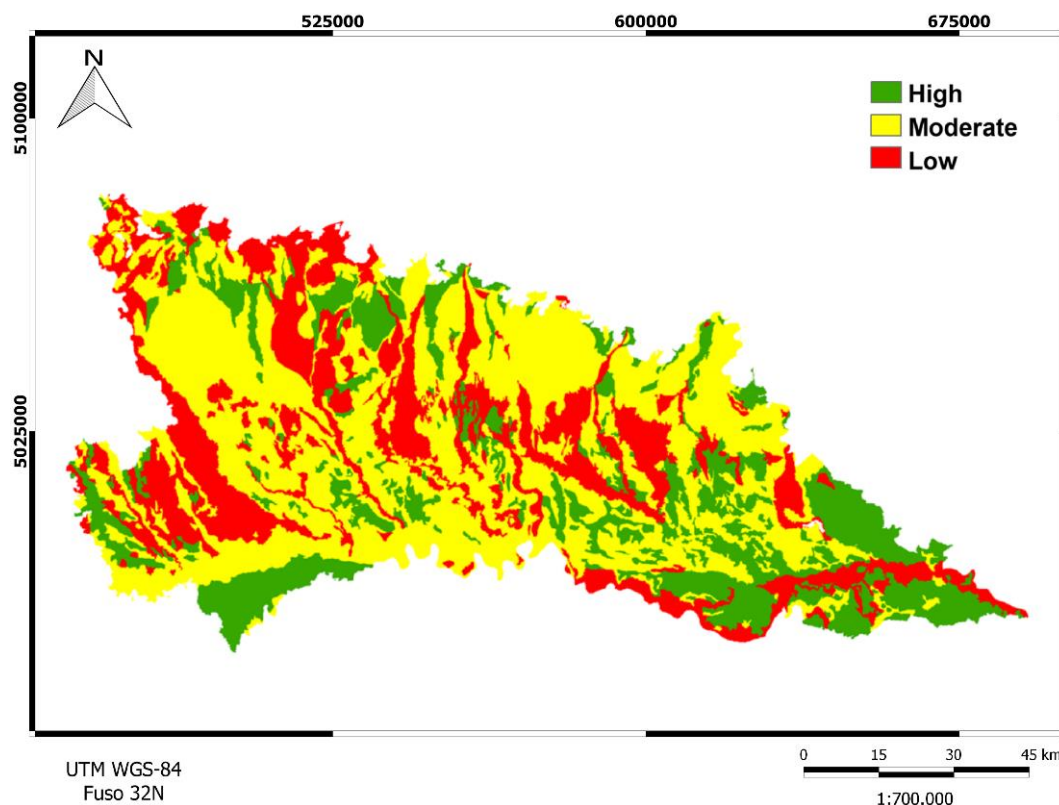


Figura 2. Carta della capacità protettiva dei suoli della Pianura Lombarda nei confronti delle acque sotterranee alla scala 1:250.000 (modificato: Stevenazzi et al., 2015).

Le caratteristiche chimico-fisiche dei suoli della Pianura Padana lombarda dipendono dalla granulometria, dalla tessitura e dai processi che in essi avvengono che vanno ad influenzare il pH, il contenuto in carbonio organico, la capacità di scambio cationico, la conducibilità e condizioni di aerazione. Queste caratteristiche sono quelle che condizionano la capacità di attenuazione dei rischi di contaminazione delle acque (ERSAF, 2015).

1.2.3. Contributo del telerilevamento nella mappatura dei suoli

Il telerilevamento è una disciplina tecnico-scientifica che prevede la raccolta di informazioni qualitative e quantitative mediante dei sensori non in contatto diretto

con essi (Gomasca, 2010), che sfrutta l'informazione contenuta nell'onda elettromagnetica emessa (*radianza*) o riflessa (*riflettanza*) da sorgenti naturali e/o antropiche (Mantovani & Marcolongo, 1992; Zilioli et al., 1992; Brivio et al., 1993; Brivio et al., 2006). Il telerilevamento è uno strumento in grado di creare elaborati spazializzati su vaste aree nel tempo (Congedo & Munafò, 2012; Valentini et al., 2015). Risoluzione spettrale, spaziale e radiometrica sono le principali caratteristiche da prendere in considerazione nella mappatura delle coperture e dei suoli.

La classificazione delle immagini ottiche telerilevate per la creazione di mappe tematiche è un metodo che prevede l'identificazione di una serie di caratteristiche presenti nella scena attraverso un algoritmo basato sulle risposte spettrali dei pixel (Sartori, 2001; Richards & Jia, 2006; Gomasca, 2010). L'approccio metodologico utilizzato in questa tesi è la LSMA (*Linear Spectral Mixture Analysis*), tecnica molto utilizzata nell'ambito della mappatura di ambienti naturali, poiché in grado di ovviare al problema dei pixel misti e all'assegnazione di ciascun pixel ad una classe univoca (tipico delle classificazioni rigide; Adams et al., 1986 e 1993; Smith et al., 1990; Elmore et al., 2000; Small, 2004). La tecnica, a risoluzione sub-pixel, permette di ottenere le abbondanze delle componenti fondamentali (*endmember*) dei singoli pixel costituenti la scena (Smith et al., 1985 e 1990; Boardman, 1993; Adams et al., 1995; Taramelli et al., 2013 e 2014). Generalmente, i pixel sono una superficie eterogenea dal punto di vista spettrale risultanti da segnali complessi contenenti più di un materiale (pixel misti), ed è raro che un pixel sia composto esclusivamente da una singola componente fisica fondamentale (Johnson et al., 1983; Smith et al., 1985; Adams et al., 1986; Taramelli & Melelli, 2009). La procedura di selezione degli endmembers prevede, in fase iniziale, una riduzione della dimensionalità del dato e l'aumento della separabilità tra gli EM attraverso la PCA (*Principal Component Analysis*). Il prodotto è una mappa delle abbondanze degli EM considerati che vengono successivamente interpretati e ricondotti a determinate matrici ambientali attraverso l'utilizzo di un albero delle decisioni, permettendo così di determinare la variabilità spaziale delle coperture individuate nella fase di selezione degli EM.

L'analisi di due differenti dataset, ottenuti dalle missioni Landsat-7 e Landsat-8, possono fornire l'opportunità di identificare l'evoluzione spaziale e temporale delle coperture presenti sulla superficie terrestre.

Infine, tramite un'analisi statistica si è cercato di correlare le abbondanze e le riflettanze, prodotti da EO, con le tessiture dei suoli ricavate dalla consultazione delle carte pedologiche, per constatare se una specifica abbondanza o riflettanza sia descrittiva di una o più classi tessiturali.

1.2.4. Metodi di valutazione della vulnerabilità

In generale, per vulnerabilità degli acquiferi si intende la propensione dei sistemi acquiferi ad essere impattati da contaminanti di origine antropica provenienti da superficie (De Maio et al., 2001; Masetti, 2012) e si distingue in:

- *Vulnerabilità intrinseca (o naturale)*, è la suscettibilità dei sistemi acquiferi ad ingerire e diffondere un inquinante tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo (Civita, 1987), in funzione delle sole caratteristiche geologiche, idrologiche e idrogeologiche dell'area.
- *Vulnerabilità specifica*, riferita a una determinata sostanza inquinante (o gruppo) ed è funzione delle proprietà che ne descrivono il comportamento nel sottosuolo (Masetti, 2012).

La vulnerabilità di un acquifero è legata alla possibilità di penetrazione e propagazione di un eventuale inquinante nell'acquifero stesso, per cui dipende principalmente dall'attitudine di un deposito a farsi attraversare da parte di un eventuale inquinante (ERSAF, 2004). Esistono vari metodi per la valutazione della vulnerabilità che si differenziano in base al grado di approfondimento delle fasi in cui si attua il processo di contaminazione dell'acquifero attraverso l'utilizzo di parametri idonei a caratterizzarle. Questi possono essere suddivisi in due grandi gruppi (Focazio et al., 2002; Arthur et al., 2007):

- Metodi Soggettivi (*knowledge-driven models*);
- Metodi Oggettivi (*data-driven models*).

1.2.4.1. Metodi soggettivi

Questa tipologia di metodi include due sistemi di valutazione, ovvero i metodi parametrici (*overlay-index*) e i metodi ibridi. Da un punto di vista essenzialmente tipologico, è necessario suddividere la metodologia in due gruppi fondamentali (Gogu and Dassargues 2000):

- Metodi di valutazione per Complessi e Situazioni Idrogeologiche (Zonazione per aree omogenee).
- Metodi di Valutazione per sistemi parametrici.

Metodi di valutazione per Complessi e Situazioni Idrogeologiche (CSI o Zonazione per aree omogenee)

I metodi di zonazione per aree omogenee valutano la vulnerabilità per Complessi e Situazioni Idrogeologiche (CSI), usando la tecnica di sovrapposizione cartografica. Un esempio di metodo CSI è il cosiddetto “Metodo Base GNDCI-CNR” (Civita, 1987) che fornisce una descrizione qualitativa dell’assetto idrogeologico con il relativo grado di vulnerabilità intrinseca. Si tratta di sistemi di valutazione del tipo universale, adatti ad essere usati su territori vasti ed articolati dal punto di vista idrogeologico, idrostrutturale e morfologico. I parametri presi in considerazione sono: caratteristiche idrolitologiche del saturo e dell’insaturo, soggiacenza, permeabilità relativa, velocità di percolazione degli acquiferi, caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli, collegamento con i corpi idrici superficiali e ricarica attiva.

Metodi di Valutazione per sistemi parametrici

Questo gruppo è rappresentato dai principali metodi di valutazione della vulnerabilità utilizzati in campo internazionale:

- Sistemi a matrice (Matrix Systems – MS);
- Sistemi a punteggio semplice (Rating Systems – RS);
- Sistemi a punteggi e pesi (Point Count System Models – PCSM).

I sistemi a matrice (MS) hanno un utilizzo quasi sempre locale e si basano su un limitato numero di parametri, opportunamente selezionati, organizzati in classi (Goosens & Van Damme, 1987; Carter et al., 1987).

I sistemi a punteggio semplice (RS) traggono più o meno tutti spunto dal sistema LeGrand (1964 e 1983). A ciascuno dei parametri prescelti come necessari e sufficienti per la valutazione della vulnerabilità intrinseca è attribuito un intervallo di punteggio, quasi sempre fisso. Questo è suddiviso in funzione dell'intervallo di variazione del singolo parametro. Viene, quindi, ottenuta la valutazione desiderata per ciascun punto o area presa in considerazione dalla sommatoria dei punteggi. La gamma completa dei punteggi (tra minimo e massimo) è, sovente, suddivisa in segmenti, a ciascuno dei quali è attribuito un grado di vulnerabilità. I dati di base che sono utilizzati in questi sistemi sono molteplici, prevalentemente legati alle caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli, ai dati idrogeologici e idrologici principali. I metodi GOD e AVI sono due esempi di sistemi RS (Foster, 1987; Stempvoort et al., 1993).

Un'evoluzione nei sistemi di valutazione parametrica si è registrata con l'avvento delle metodologie basate sul punteggio e sul peso (PCSM). Tale metodologia introduce una o più linee di pesi (weights), cioè un moltiplicatore a gamma fissa per ciascun parametro di base considerato, che amplifica il punteggio attribuito al parametro stesso in misura preordinata, allo scopo di evidenziare l'importanza di uno o più parametri. Il metodo DRASTIC (Aller et al., 1987) è il più utilizzato a livello mondiale per valutare la vulnerabilità degli acquiferi a varie scale, dalla nazionale sino alla locale. I parametri presi in considerazione sono: profondità della falda, ricarica netta, tipo di acquifero, tessitura dei suoli, topografia, impatto della zona vadosa e permeabilità dell'acquifero. Altri metodi sono il SINTACS (Civita, 1994), EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997), GLA (Höling et al., 1995); PI (Goldscheider et al., 2000), SEEPAGE (Navulur, 1996) e loro modificazioni (Sener & Davraz 2013).

Metodi soggettivi Ibridi

Sono dei sistemi che si basano su studi comparativi delle diverse tecniche di valutazione della vulnerabilità. In genere, usano la struttura dei modelli base ma impongono l'assegnazione di punteggi e pesi come nei punti parametrici (Civita & De Maio, 2004).

1.2.4.2. Metodi oggettivi

Tali sistemi producono una valutazione della vulnerabilità oggettiva, normalmente sito-specifica, e include:

- Metodi *processed-based*;
- Metodi statistici.

Metodi *processed-based*

I metodi process-based simulano uno o più processi fisico-chimici del flusso delle acque sotterranee e il trasporto di potenziali contaminanti al fine di valutare la vulnerabilità delle falde acquifere (Focazio et al., 2002). Includono l'uso sia di modelli deterministici di simulazione dei processi che di tecniche basate sull'osservazione diretta in campo.

Metodi statistici

Si basano sulla ricerca delle correlazioni statistiche esistenti tra la distribuzione dei fattori (*predittori*) che si ritiene siano importanti nell'influenzare la vulnerabilità dell'acquifero e le caratteristiche qualitative della falda (Masetti, 2012). Per la valutazione, vengono utilizzati anche i dati relativi alle concentrazioni dei contaminanti rilevati nella falda in esame (Masetti et al., 2009). I modelli statistici vanno dall'uso di semplici statistiche descrittive (Welch et al., 2000) a tecniche più complesse, come la regressione (Eckhardt & Stackelberg, 1995) e l'analisi della probabilità condizionata (Alberti et al., 2001; Worrall & Besien, 2005; Masetti et al., 2009), in modo da determinare oggettivamente l'importanza di ogni predittore nell'influenzare la vulnerabilità e di scartare quelli non significativi (Masetti, 2012). Correlano, a varie scale spaziali, la presenza di contaminanti all'interno dell'area di studio con le proprietà intrinseche del sistema

acquifero e le potenziali fonti di contaminazione, nel tentativo di prevederne le concentrazioni (Gardner & Vogel, 2005) o la probabilità di contaminazione, in funzione a dei valori limite prestabiliti (Mueller et al., 1997; Tesoriero & Voss, 1997; Greene et al., 2005; Masetti et al., 2009). I predittori possono essere selezionati in funzione delle caratteristiche dell'area in esame e dei dati disponibili (Masetti, 2012).

Quando sono disponibili sufficienti dati sulla qualità delle acque, metodi come l'analisi di regressione logistica (*Logistic Regression*) e/o la tecnica *Weights of Evidence* (*WofE*) sono spesso utilizzati per la definizione della vulnerabilità in termini di probabilità di contaminazione (Hosmer & Lameshow, 1989; Tesoriero and Voss, 1997; Nolan et al., 2002; Masetti et al., 2008; Sorichetta et al., 2013). I metodi oggettivi (statistici) sono da preferire nel calcolo della vulnerabilità, poiché si basano su dati di campo e non su opinioni soggettive, rafforzando la difendibilità dei risultati (Focazio et al., 2002).

La metodologia WofE, recentemente sviluppata dall'Università di Milano, consente di correlare statisticamente gli elementi che possono concorrere alla vulnerabilità delle acque sotterranee da nitrati con i dati dei monitoraggi delle acque medesime, ed è il metodo di riferimento per l'aggiornamento delle carte di vulnerabilità della Lombardia (fonte: www.agricoltura.regione.lombardia.it). La valutazione dettagliata della vulnerabilità da nitrati attraverso la produzione di carte di vulnerabilità è stata ottenuta con l'utilizzo del metodo statistico WofE, basato sul teorema di Bayes, come riportato nei recenti lavori di Masetti et al. (2007 e 2008), Sorichetta et al. (2013) e Stevenazzi et al. (2015).

1.2.5. Le Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN)

In attuazione della normativa comunitaria e nazionale, e sulla base dei criteri ivi contenuti, le Regioni Italiane territorialmente competenti hanno provveduto a definire e designare le ZVN (Capri et al., 2009), tenendo conto delle proprietà fisiche ed ambientali delle acque e dei terreni specificate nella Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (2006). Dall'aggiornamento delle ZVN realizzato nel 2009, circa il 14.2% della superficie totale del territorio nazionale è vulnerabile ai

nitriti (Capri et al., 2009; MIPAAF, 2009). Le acque sotterranee della Pianura Padana sono particolarmente soggette da un intenso inquinamento da nitriti. Secondo la Direttiva Nitriti, infatti, tale area è classificata come una delle più vulnerabili alla contaminazione di nitriti dell'Europa (EC, 1991). La mappa riportata nella seguente Figura 3 rappresenta le ZVN identificate in Italia.



Figura 3. Le zone vulnerabili ai nitriti in Italia (da: Capri et al., 2009).

Capitolo 2

DESCRIZIONE DELL'AREA DI STUDIO

2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TERRITORIALE

L'area di studio si colloca all'interno della Pianura Padana, nel settore centro meridionale della Regione Lombardia (Pianura Lombarda) a S-SE dal Comune di Milano ed è delimitata a sud dal corso del fiume Po, che rappresenta il confine amministrativo meridionale della regione (Figura 4). Complessivamente, la superficie si estende per circa 1800 km², comprendendo, nella sua totalità, la Provincia di Lodi, e parzialmente, le Province di Milano, Pavia, Bergamo e Cremona. I comuni territorialmente competenti sono 147, di cui 13 in Provincia di Bergamo, 27 in Provincia di Cremona, 61 in Provincia di Lodi, 26 in Provincia di Milano e 20 in Provincia di Pavia. Si tratta di un territorio interamente pianeggiante che degrada progressivamente da N-NO verso SE.

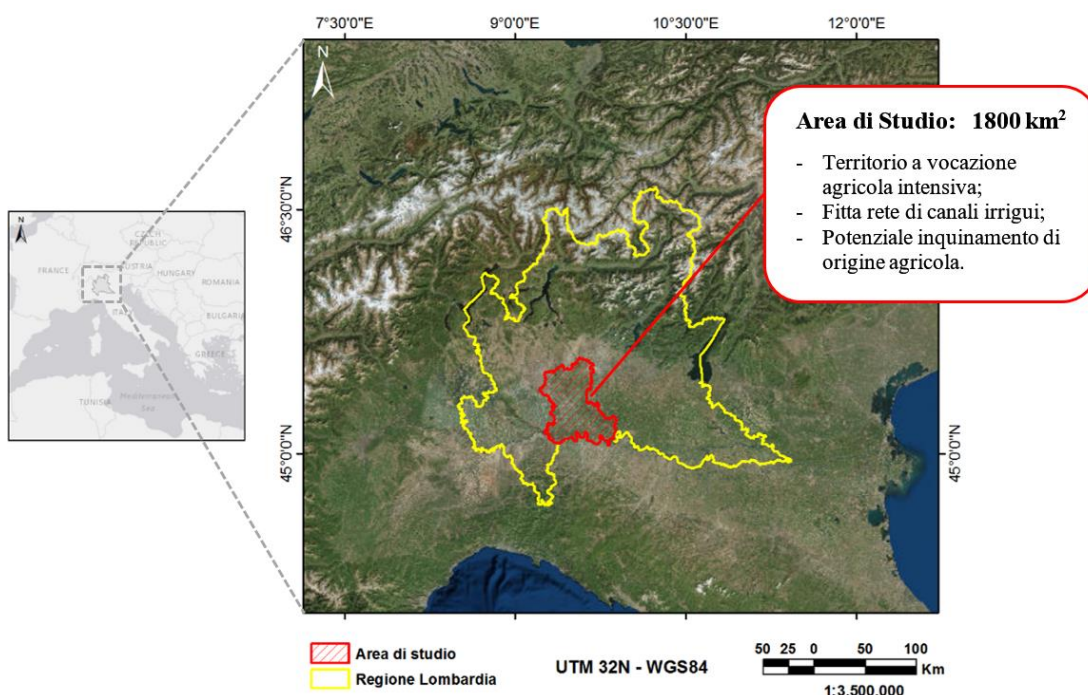


Figura 4. Localizzazione dell'area di studio (limiti evidenziati in rosso), all'interno della Pianura Padana. In giallo, i confini amministrativi della Regione Lombardia.

La popolazione residente è calcolata in 773379 unità al 31 dicembre 2014, con una densità abitativa media di 430 abitanti/km². La fonte di tale indagine è il censimento ISTAT, (disponibile su <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/>).

Il settore agricolo ha una forte rilevanza economica in gran parte del territorio scelto, grazie alla presenza di un gran numero di aziende ad indirizzo cerealicolo-zootecnico, tipiche della Pianura Lombarda. Nonostante l'elevata urbanizzazione, l'agricoltura svolge una funzione prevalente in termini di uso del suolo (ERSAF, 2009). Risulta importante evidenziare come la forte antropizzazione e lo sviluppo sul territorio di attività agricole e/o industriali determinano una richiesta idrica elevata. Di conseguenza, anche in una zona ricca d'acqua come quella in esame, la risorsa idrica diviene una risorsa strategica. Da un punto di vista territoriale è possibile distinguere il territorio lombardo in 4 grandi distretti: le Alpi Centrali, le Prealpi Lombarde, l'Appennino dell'Oltrepò e la Pianura Lombarda, suddivisa a sua volta in Alta, Media e Bassa Pianura. Quest'ultima distinzione è possibile sulla base della composizione granulometrica dei sedimenti: l'Alta Pianura occupa il territorio a ridosso di Prealpi e Appennini, tipicamente costituita da materiali grossolani (sabbia e ghiaia); nella Media Pianura i depositi sono rappresentati da materiali progressivamente più fini, costituiti da ghiaie e sabbie con digitazioni limose ed argillose, le quali diventano sempre più frequenti da monte a valle; la Bassa Pianura è formata da materiali tendenzialmente più fini.

2.1.1. Comprensori di bonifica e di irrigazione

Il settore agricolo lombardo trova ampia applicazione nella piana irrigua, pianura della Lombardia bonificata nel tempo, che costituisce oggi il cosiddetto *territorio di bonifica ed irrigazione*: la produzione agricola si svolge per l'80% in tale pianura, dove si concentra una produzione tra le più redditizie d'Europa (ARPA Lombardia, 2002; ERSAF, 2009). Attualmente, a seguito del riordino dei consorzi di bonifica e irrigazione, il territorio lombardo non montano (area di pianura e di media collina, cioè circa la metà della superficie regionale) risulta suddiviso in 12 comprensori (Figura 5). Quest'ultimi sono funzionali alle esigenze di programmazione e gestione dell'attività di bonifica e d'irrigazione, all'interno dei

quali operano i *consorzi di bonifica, di miglioramento fondiario e di irrigazione* (URBIM, 2003; INEA, 2009). I comprensori sono delle unità omogenee sotto il profilo idrografico e idraulico, delimitati principalmente da elementi naturali (fiumi e Prealpi). L'agricoltura lombarda, senza un'adeguata rete di canali (irrigui e di bonifica), non presenterebbe il rilievo qualitativo e quantitativo che la pone ai vertici dell'agricoltura europea (ARPA Lombardia, 2002; ERSAF, 2009). Alla rete di irrigazione provvedono i consorzi, i quali gestiscono le risorse idriche per l'agricoltura, razionalizzando l'utilizzazione delle risorse idriche, e svolgendo delle specifiche funzioni per la soluzione dei problemi idraulici e di difesa del suolo, come l'esecuzione, la manutenzione e la gestione delle opere idrauliche e di irrigazione.

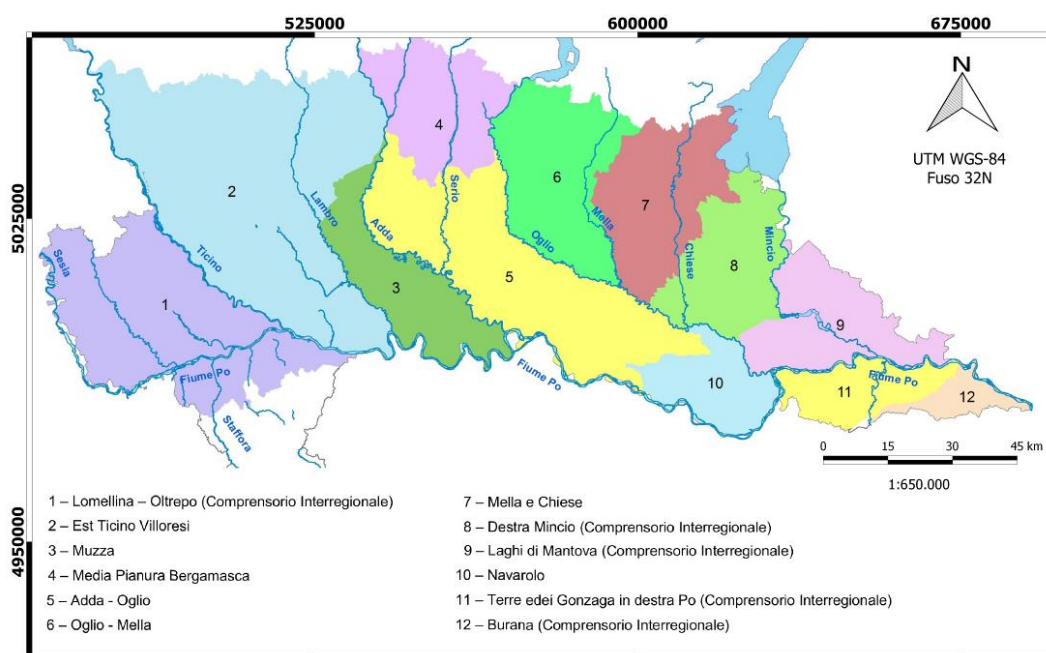


Figura 5. *Consorzi di bonifica e irrigazione della Regione Lombardia* (fonte: <http://www.territorio.regione.lombardia.it>).

Gran parte dell'estensione totale della superficie analizzata in questa tesi è appartenente al bacino irriguo del “*Canale della Muzza*”, uno dei primi canali artificiali costruiti al mondo e quello italiano con maggiore portata, gestito dal Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana che, con una superficie di 670 km² ed una rete fittissima di corsi d'acqua, rappresenta il principale comprensorio

presente nell'area di studio. Oltre a quello della Muzza, sono inclusi i comprensori "Est Ticino Villoresi" ed "Adda-Oglio".

L'irrigazione prevalente è quella per scorrimento pressoché su tutto il territorio lombardo, soprattutto nell'area centro-meridionale della regione. Si calcola che le superfici irrigate a scorrimento dai consorzi interessino il 59.3% del totale, come mostrato in Figura 6 (ERSAF, 2009; INEA, 2009). L'irrigazione per scorrimento, oltre ad essere assolutamente priva di costi energetici, garantisce il permanere di una fitta rete di canalizzazioni a cielo aperto. La prevalenza del sistema a scorrimento va associata alle colture praticate (mais, prati), alle disponibilità idriche, ma anche alle caratteristiche della rete irrigua (INEA, 2009).

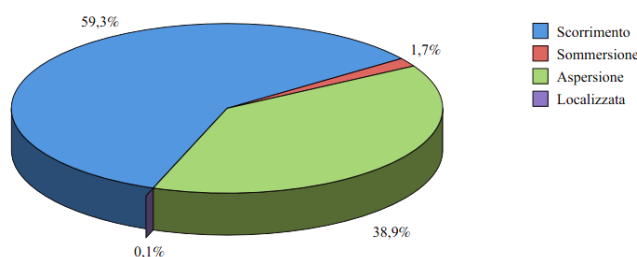


Figura 6. Sistemi di irrigazione adottati a livello regionale (da: INEA, 2009).

2.2. IDROGRAFIA

2.2.1. Bacino idrografico principale

La Lombardia è la regione italiana più ricca di acque superficiali, solcata da numerosi laghi, fiumi, affluenti e subaffluenti del fiume Po, oltre ad un gran numero di corsi d'acqua artificiali (canali e rogge). Il territorio lombardo ricade interamente nel bacino del fiume Po che, con una superficie di circa 70000 Km² (approssimativamente un quarto del territorio nazionale), rappresenta il bacino idrografico principale dell'Italia, interessando più regioni territorialmente competenti (quali Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Veneto, Liguria, Emilia Romagna e parzialmente Trentino Alto Adige), e 3200 comuni, di cui 1541 soltanto in Lombardia (Figura 7).

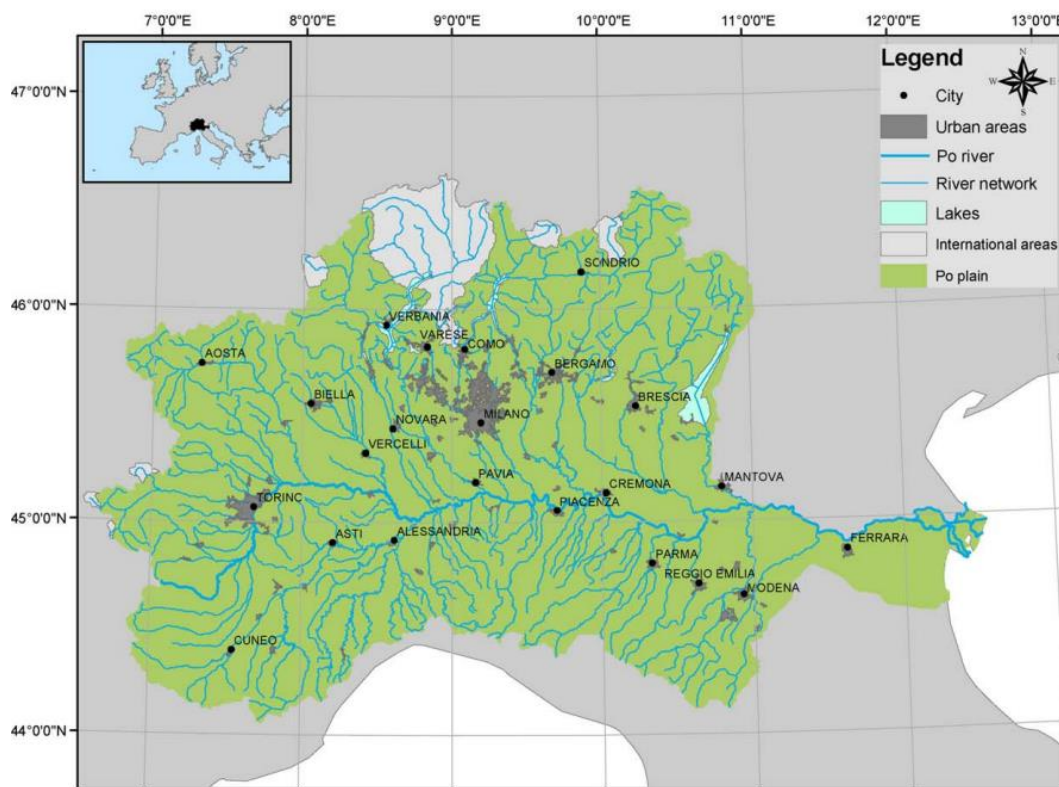


Figura 7. Bacino idrografico del fiume Po (da: Cinnirella et al., 2005).

Il fiume Po nasce dal Pian del Re, ai piedi del Monviso, e sfocia nel Mar Adriatico con un delta di notevole dimensioni (380 km²) dopo aver percorso un tragitto lungo 652 km, ricevendo apporto idrico da ben 141 affluenti di origine sia alpina che appenninica (ARPA Lombardia, 2007). È il principale fiume italiano non solo per lunghezza, ma anche per la portata alla sezione di chiusura che raggiunge 10300 m³/s (Fonte: <http://www.adbpo.it> – Autorità di bacino del fiume Po). Alimentati dalle precipitazioni nevose e piovose, i fiumi lombardi hanno portate consistenti e regimi relativamente costanti. Di conseguenza, i fiumi emissari del Po costituiscono la fonte primaria di approvvigionamento idrico degli Enti irrigui regionali (INEA, 2009).

2.2.2. Reticolo idrografico superficiale

La Pianura Lombarda è contraddistinta da un complesso reticolo idrografico superficiale, con la presenza a N dei grandi laghi alpini di origine glaciale, da cui si sviluppano i fiumi principali della regione (Ticino, Adda, Oglio e Mincio),

affluenti del fiume Po, a cui si aggiungono i corsi d'acqua a regime torrentizio (Olona, Lambro, Brembo, Serio, Mella e Cherio).

La lunghezza complessiva dei corsi d'acqua naturali raggiunge circa 6000 km. Al reticolo idrografico naturale si va ad aggiungere un'importante rete di canali artificiali (circa 200000 km censiti) che permette lo sviluppo di un'efficiente attività agricola, nonostante la forte urbanizzazione che caratterizza il territorio (ARPA Lombardia, 2002). Infine, un altro importante elemento idrografico che caratterizza la zona centrale della Pianura Lombarda sono i *fontanili* e le *risorgive*.

Nella seguente Figura 8, si riporta il reticolo idrografico superficiale dell'area di studio, sia di origine naturale che artificiale, comprensivo anche dei fontanili censiti nel 2013 (dati disponibili sul Geoportale della Regione Lombardia, <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>).

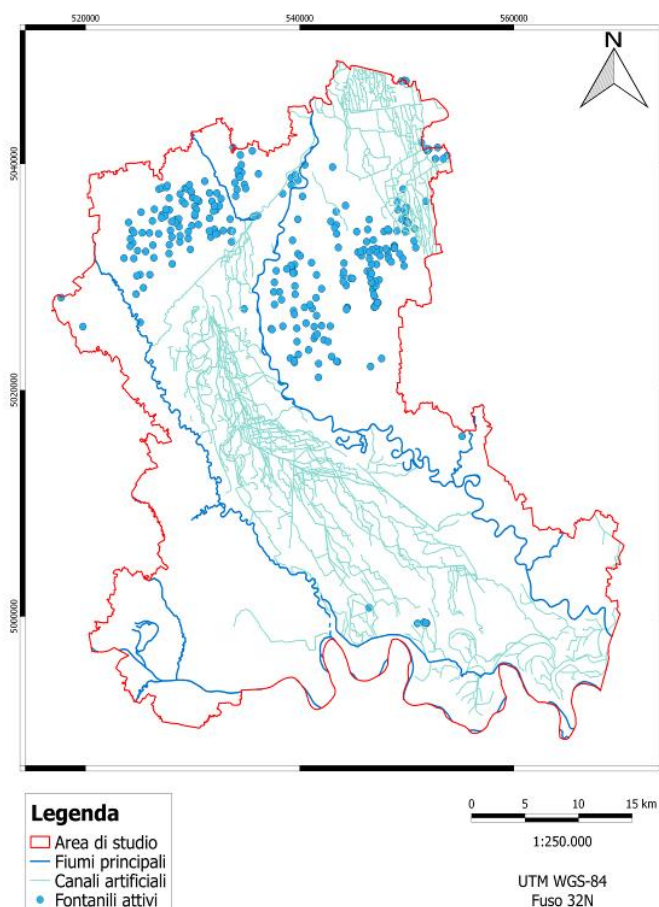


Figura 8. Idrografia principale e localizzazione dei fontanili attivi nell'area di studio.

2.2.3. Fascia delle Risorgive: i Fontanili

L'idrografia del territorio in esame è caratterizzata dalla presenza della "*Fascia delle Risorgive*", le cui acque contribuiscono a soddisfare i fabbisogni irrigui del settore agricolo.

In generale, per *fontanile* si intende una presa d'acqua nella falda acquifera non affiorante (ma molto superficiale) creata dall'uomo per far risalire e sfruttare a scopo irriguo le acque sotterranee (Baratti, 1999; Regione Lombardia, 2012). Si tratta di un'opera antropica che come tale si differenzia dalle naturali *risorgive*, anche se da esse trae origine. In altri termini, la risorgiva fa riferimento ad un affioramento naturale dell'acqua in superficie, mentre si parla di fontanile quando è il risultato dell'azione dell'uomo (Regione Lombardia, 2012).

Le risorgive hanno origine dall'interazione tra acque superficiali e acque sotterranee, conseguenza di una combinazione di caratteristiche naturali e uso del territorio da parte dell'uomo (Baratti, 1999).

La fascia delle risorgive è dovuta a variazioni strutturali nei depositi costituenti il sottosuolo e, in particolare, alla progressiva comparsa di terreni a bassa permeabilità che sbarrano il flusso delle acque sotterranee favorendone la graduale emersione in superficie. L'ubicazione delle risorgive coincide con la zona della Media Pianura poiché in essa si verifica una diminuzione della permeabilità che implica un affioramento in superficie delle acque sotterranee (INEA, 2009). La fascia delle risorgive segna la transizione fra Alta e Bassa Pianura: le acque sotterranee, infiltrate nei terreni ghiaiosi e permeabili a monte, risalgono fino al piano campagna a seguito dello sbarramento operato dalla progressiva comparsa di strati granulometricamente più fini e impermeabili (argilloso-limosi), ed affiorano in corrispondenza della fascia delle risorgive dove inizia la bassa pianura. Quindi, l'infiltrazione a monte delle acque superficiali e di precipitazione dipende dalla conformazione geomorfologica della Pianura Padana (Regione Lombardia, 2012).

In Figura 9 si riporta la fascia delle risorgive che interessa la Pianura Padana, anche se i limiti di tali risorgive possono variare in funzione delle oscillazioni piezometriche della falda.

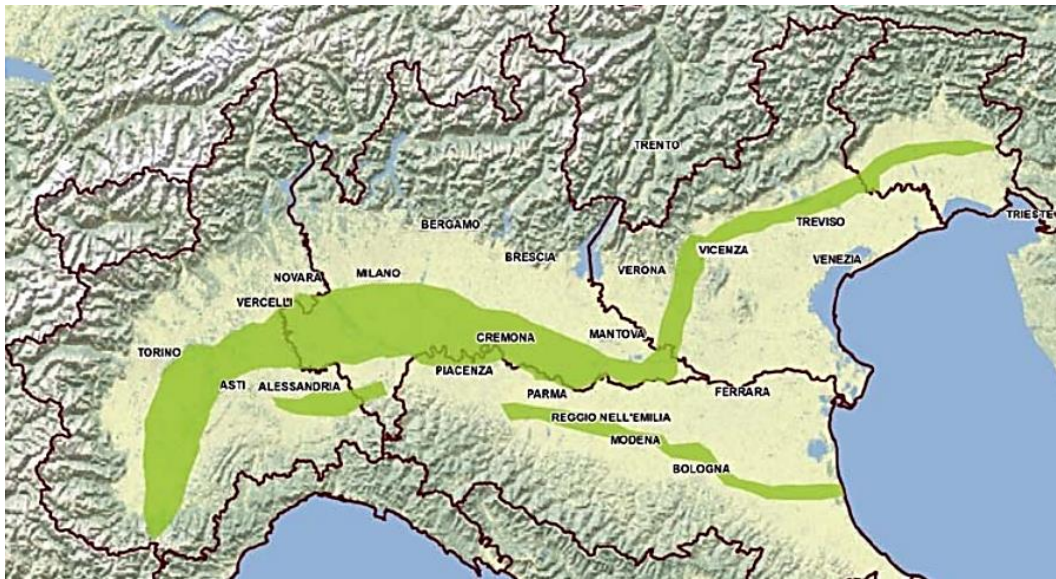


Figura 9. Fascia delle Risorgive (da: Regione Lombardia, 2012).

2.3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

2.3.1. Inquadramento geologico

La Pianura Padana nel suo insieme rappresenta l'espressione morfologica di superficie del Bacino Padano, un bacino sedimentario di età terziaria compreso tra le strutture alpine, a vergenza meridionale, e le strutture appenniniche, a vergenza settentrionale (Figura 10). L'evoluzione tettonica del Bacino Padano, connessa all'attivazione di sovrascorrimenti del basamento e/o riattivazioni di faglie preesistenti all'interno della copertura (Boccaletti & Sani, 1998), assieme alle variazioni climatiche succedutesi nel tempo che condizionarono la dinamica sedimentaria (oscillazioni eustatiche), hanno determinato l'architettura dei depositi presenti. Gli aspetti strutturali più importanti del Bacino Padano sono però sepolti sotto una consistente coltre sedimentaria: la struttura geologica profonda è nota attraverso gli approfondimenti realizzati durante le esplorazioni per la ricerca di idrocarburi (Pieri & Groppi, 1981; Cassano et al., 1986).

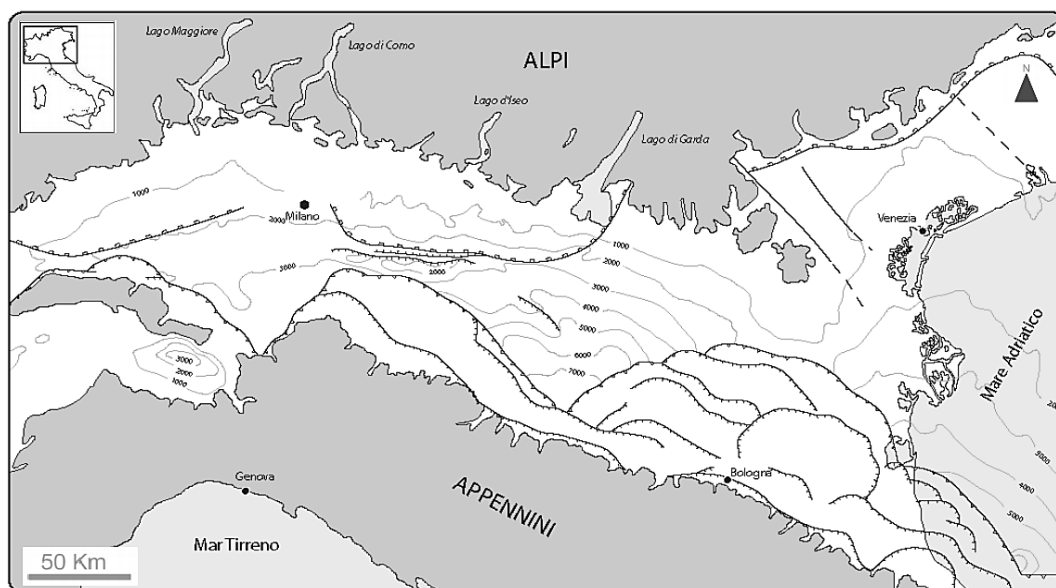


Figura 10. Assetto strutturale della Pianura Padana (modificato: ISPRA, 2015b)

Ad oggi, diversi approfondimenti hanno messo in luce le caratteristiche strutturali del Bacino Padano e del suo riempimento sedimentario (Pieri & Groppi, 1981; Bigi et al., 1990; Mariotti & Doglioni, 2000; Castiglioni & Pellegrini, 2001; Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002; Bello & Fantoni, 2002; Amorosi & Colalongo, 2005; Amorosi, 2008).

La Pianura Padana può essere definita come un bacino di foreland in evoluzione, per progressiva migrazione della placca africana verso quella europea con conseguente subduzione della microplacca padano-adriatica a partire dal Cretaceo (Channell et al., 1979; Pieri & Groppi, 1981; Dercourt et al., 1986).

Durante l'Oligocene la formazione della catena appenninica porta allo sviluppo di bacini di avana fossa profondi e subsidenti caratterizzati dall'accumulo di potenti successioni torbiditiche e depositi di mare basso in bacini marginali di modesta estensione (Ricci Lucchi et al., 2002). La trasgressione marina verificatasi all'inizio del Pliocene invase gran parte delle terre emerse, determinando un dominio marino da cui emergevano solo le catene principali, alpina e appenninica (vedi Figura 11a). L'attuale Pianura Padana risultava completamente sommersa, a formare un profondo golfo tra le due catene montuose in cui sedimentavano i detriti provenienti dalla degradazione dei rilievi emersi (Carbognin & Tosi, 2003).

Durante l'ultima glaciazione del Würm (circa 20000 anni fa) si è ebbe invece una regressione marina che abbassò il livello del mare di circa 120 m rispetto a quello attuale, poiché grandi quantità d'acqua erano trattenute nei ghiacciai continentali; si formò di conseguenza una vasta pianura alluvionale (vedi Figura 11b). Nel corso dell'Olocene, la fascia costiera fu interessata nuovamente da un rapido innalzamento del livello marino conseguente alla deglaciazione post-würmiana (14000 anni fa).

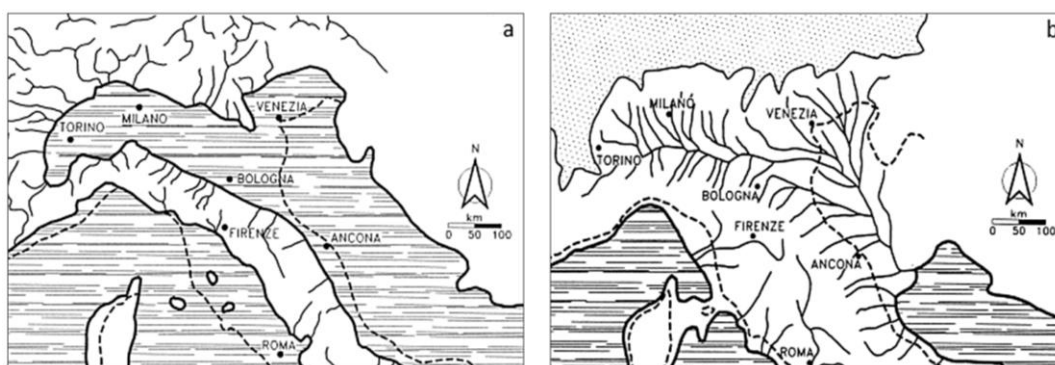


Figura 11. Rappresentazione della Pianura Padana: a) nel Pliocene (5-2 MA); b) durante l'ultima fase glaciale würmiana, circa 20000 anni fa (da: Leonardi, 1968).

I depositi quaternari rappresentano degli accumuli disposti, alla scala del bacino, in ampie ondulazioni, con geometrie lenticolari interpretabili come colmamento delle depressioni residue del sistema bacinale pliocenico precedente. L'architettura del riempimento quaternario del Bacino Padano è caratterizzata da un insieme di sequenze deposizionali, con una generale tendenza regressiva interrotta da fluttuazioni minori, testimoniata dal passaggio da depositi pliocenici di ambiente marino a sedimenti marino-marginali e poi alluvionali (Ricci Lucchi et al., 1982; Ricci Lucchi, 1986; Ori, 1993). Il riempimento del bacino marino ed il passaggio alla sedimentazione continentale sono il risultato di eventi tettonico-sedimentari parossistici, separati nel tempo da periodi di forte subsidenza bacinale e attività ridotta delle strutture compressive, in cui la deposizione di livelli detritici fini è legata alle fluttuazioni eustatiche (Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002). Pertanto, la coltre quaternaria è costituita per la maggior parte da sedimenti continentali intercalati con depositi marini, che riflettono il susseguirsi delle fasi regressive e trasgressive del mare.

Alla base del prisma sedimentario progradante sia assialmente (legato all'azione del paleo Po), che trasversalmente (originato dai depositi dei sistemi alpini e appenninici), sono presenti sedimenti torbiditici di mare profondo (Muttoni et al., 2003).

Dal Messiniano si riducono notevolmente i movimenti tettonici legati alla strutturazione dell'edificio alpino (Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002) mentre, nel periodo tra Messiniano e Quaternario, la tettonica di accrezione dell'Appennino settentrionale interessa le zone marginali della catena, coinvolgendo l'avampaese padano. Perciò, le caratteristiche geologiche della Pianura Lombarda sono strettamente legate agli avvenimenti succedutisi a partire dal tardo Miocene, ai quali si deve la formazione di un sottosuolo costituito da sedimenti appartenenti al sistema deposizionale continentale padano di età plio-pleistocenica (IRSA-CNR, 1981).

2.3.2. Inquadramento geomorfologico

L'evoluzione della Pianura Padana è legata allo sviluppo della catena alpina e di quella appenninica, rappresentando, già dal Miocene, il bacino d'avanfossa di tali sistemi montuosi (Bacino Padano). Occupata dal mare per quasi tutto il Pliocene, questa depressione è stata progressivamente colmata dalla deposizione di un notevole spessore di sedimenti, in parte marini ed in parte continentali.

Dopo la forte fase erosiva del Miocene (Finckh et al., 1984), l'evoluzione plio-pleistocenica della Pianura Padana, all'interno della quale si inserisce l'area in esame, può essere così sintetizzata:

- *Fase di ritiro del mare e di sedimentazione* dei depositi continentali fluviolacustri, deltizi e di pianura costiera su parte della pianura, caratterizzati da granulometrie non grossolane (sabbie fini, limi e argille), a partire dal Pliocene superiore - Pleistocene inferiore (2.58 MA).
- *Fase glaciale pleistocenica* che comprende le principali fasi glaciali (Gunz, Mindel, Riss e Würm) che diedero luogo alla deposizione di una vasta coltre di sedimenti glaciali nelle aree pedemontane e di sedimenti alluvionali fluvioglaciali nella pianura (1.7-0.01 MA).

- *Fase postglaciale olocenica* di deposizione prevalentemente alluvionale (sedimenti ghiaioso-sabbiosi e limosi deposti nelle aree di pianura dai corsi d'acqua) e fenomeni di erosione, a partire da 0.01 MA.

I periodi interglaciali sono caratterizzati dall'alternanza di fasi erosive e fasi deposizionali, le quali hanno generato un sistema di terrazzi che si estende nella porzione più alta della pianura, tra gli anfiteatri morenici e la media pianura idromorfa. Le strutture terrazzate più antiche sono costituite da materiale fluvioglaciale mindeliano, mentre quelli più recenti da materiale depositatosi nella successiva fase glaciale, ovvero durante il Riss (0.3-0.1 MA). Dall'ultima glaciazione würmiana, gli eventi di erosione fluviale hanno rappresentato l'evoluzione geomorfologica dell'area, con l'incisione dei depositi di conoide tardo-pleistocenica. Le acque di fusione dei ghiacciai hanno determinato un innalzamento del livello della pianura fino all'odierna morfologia, in successione ai sedimenti di origine marina costituiti principalmente dalle argille (che si ritrovano a profondità mediamente di 90-100 m rispetto al piano campagna). La granulometria dei sedimenti è decrescente da N verso S a causa della riduzione verso tale direzione dell'energia di trasporto e sedimentazione.

Generalmente, la distinzione dei depositi di pianura viene effettuata su base morfologica (Figura 12): in questo territorio è possibile identificare differenti livelli topografici, ognuno corrispondente ad una o più unità geologiche (ISPRA, 2015b). Sulla base dei dislivelli altimetrici, possono così distinguersi diversi ambiti geomorfologici, che dal più al meno elevato sono:

- *Anfiteatri morenici*, individuabili in corrispondenza dei rilievi collinari e collocati secondo tipiche cerchie disposte intorno ai principali laghi prealpini.
- *Terrazzi fluvioglaciali del Pleistocene*, formatisi durante il Mindel (0.5-0.30 MA), sono antiche conoidi, nate dallo smantellamento delle morene sovrastanti e dall'erosione avvenuta durante le diverse epoche glaciali ad opera dei corsi d'acqua principali, supportate dalle alluvioni fluvioglaciali.

- *Livello Fondamentale della Pianura (LFdP)*, è una piana proglaciale costituita da depositi fluviali würmiani e fluvioglaciali del Pleistocene superiore, formatesi per colmamento alluvionale durante l'ultima glaciazione quaternaria. Può essere distinto in *Alta, Media e Bassa Pianura* e, complessivamente, sono caratterizzati dall'associazione di ghiaie e sabbie con lenti di limi e di argille. I materiali più grossolani (ghiaiosi e ghiaioso-ciottolosi) si concentrano nell'Alta Pianura, mentre quelli più fini (sabbiosi-limosi) nella zona di Media e Bassa Pianura. Questo ambito geomorfologico occupa la maggior parte della superficie della Pianura Lombarda, con un'estensione che racchiude circa il 75% del territorio pianeggiante.
- *Valli alluvionali attuali e recenti*, formatesi nella fase successiva del Würm, sono il prodotto delle incisioni vallive dei corsi d'acqua principali. Sono un complesso sedimentario di origine continentale fluviale, costituito da ghiaie e sabbie generalmente prive di frazione fine. Alla base delle incisioni fluviali si ritrovano orizzonti costituiti da ghiaie, sabbie e limi di modesto sviluppo verticale.

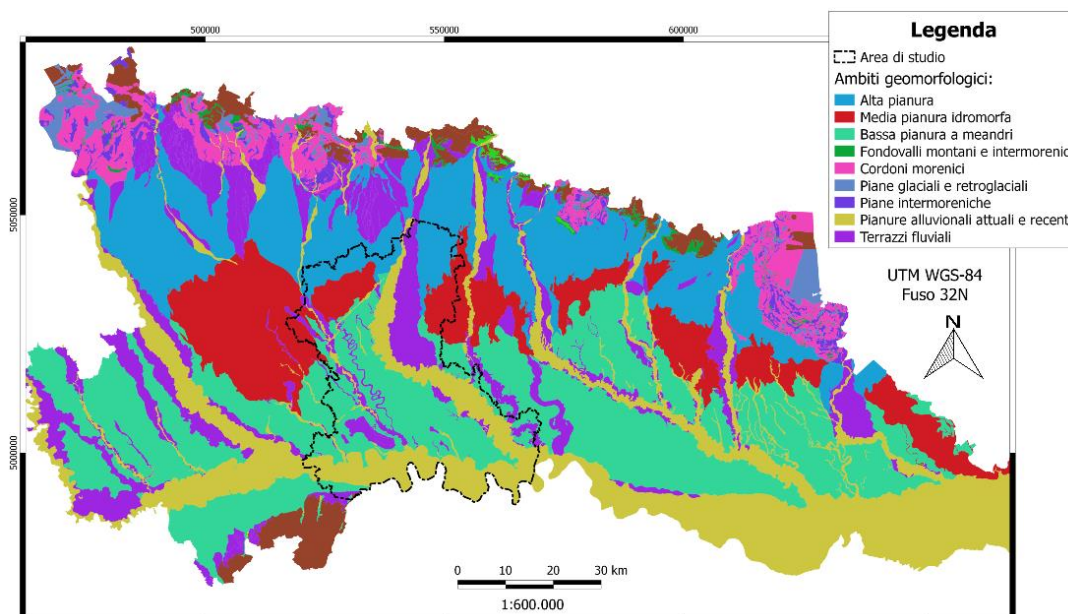


Figura 12. Geomorfologia semplificata della Pianura Lombarda (fonte: Geoportale Regione Lombardia).

2.4. STRATIGRAFIA

Sulla base caratteristiche geologiche, nel sottosuolo della Pianura Lombarda vengono identificate varie unità litostratigrafiche e, secondo la tradizionale letteratura, dalle più antiche alle più recenti, vengono così distinte (Braga & Ragni, 1969; Comizzoli et al., 1969; Orombelli, 1979; Cavallin et al., 1983; Francani, 1997; ISPRA, 2015b):

- ***Substrato roccioso indifferenziato***

Tale unità comprende varie formazioni sedimentarie e cristalline. Viene localizzato a profondità ridotte (40-60 m) solo nella parte settentrionale dell'Alta Pianura, mentre spostandosi verso S la profondità aumenta notevolmente, risultando in entrambi i casi coperto dai terreni quaternari più recenti. L'età viene attribuita dal Paleozoico al Terziario;

- ***Villafranchiano (o Unità Villafranchiana)***

Costituita prevalentemente da sedimenti continentali fini, comprende varie unità geologiche, non sempre ben distinte. La porzione basale è formata da argille e limi, mentre la parte sommitale è costituita da depositi argillosi e limosi con intercalazioni di lenti sabbiose. È una potente successione di sedimenti argillosi passanti gradualmente verso il basso a depositi marini pliocenici o quaternari (sabbie fini, limi e argille). Lo spessore di questa unità aumenta procedendo verso S (anche superiore ai 100 m). Tale unità è rappresentativa di un ambiente deposizionale transizionale come quello deltizio-lagunare e, talora, anche continentale (lacustre intra-morenico). Complessivamente, i depositi di questa formazione costituiscono la base su cui giacciono i più permeabili depositi fluvio-glaciali e alluvionali, sede degli acquiferi lombardi. La porzione basale del Villafranchiano, ricca di fossili marini, poggia sul substrato roccioso e viene attribuita al Calabriano (Pleistocene inferiore);

- ***Ceppo Lombardo***

Formazione costituita da sedimenti grossolani che si ritrovano lungo le incisioni dei principali corsi fluviali, che possono raggiungere spessori

notevoli (fino 60 m). Lo spessore è molto variabile, da sottili nelle fasce pedemontane distanti dalle aree di maggiore sedimentazione alluvionale, a molto spessi al centro della Pianura Lombarda. Litologicamente è costituita da conglomerati ed arenarie da poco a molto cementate, con frequenti lenti passanti lateralmente a ghiaie e sabbie. L'unità ricopre più o meno marcatamente il Villafranchiano;

- ***Depositi glaciali***

Raggruppamento di tutte le unità che costituiscono gli apparati morenici dell'Alta Pianura appoggiati sopra il *Ceppo Lombardo*. Litologicamente sono depositi estremamente eterogenei, con una variabilità granulometrica molto marcata, in cui si ritrovano elementi dalle dimensioni dei blocchi fino a quelli delle argille. La loro permeabilità è da bassa a scarsa, a causa dell'abbondante matrice limosa in essi contenuta. Vi è anche un'ulteriore copertura di materiale "loess", che diminuisce l'infiltrazione delle acque superficiali;

- ***Depositi terrazzati "a ferretto"***

Unità che comprende i depositi fluvioglaciali ed alluvionali che costituiscono i ripiani altimetricamente più elevati della pianura. Essi si raccordano con le cerchie moreniche a monte e con il Livello Fondamentale della Pianura tramite dei terrazzi, oppure gradualmente lungo un piano leggermente inclinato, e sono concentrati sugli altopiani terrazzati della zona pedemontana. Litologicamente sono costituiti da elementi arrotondati molto grossolani con diametro variabile, mediamente inferiore ai 10 cm, in matrice sabbioso-argillosa. Superficialmente sono alterati dai processi pedogenetici il cui prodotto ha una tipica colorazione rossastra che prende il nome di "suolo a ferretto". Lo spessore è variabile da pochi a qualche decina di metri;

- ***Alluvioni attuali e recenti***

Questi depositi rappresentano il materiale alluvionale derivante dalle esondazioni dei corsi d'acqua, ed infatti, si rinvengono negli attuali alvei

dei fiumi principali. Nel settore settentrionale essi sono costituiti da ghiaie che passano a granulometrie più fini procedendo verso S. Tale formazione è costituita da sedimenti ghiaioso-sabbiosi depositati successivamente all'ultima glaciazione, a cui si intercalano orizzonti limosi ed argillosi. Tale unità, essendo molto permeabile, permette l'alimentazione degli acquiferi sottostanti. Poggiano nella parte sommitale della serie dei depositi fluvioglaciali.

Questo sistema stratigrafico presenta al letto sedimenti di origine marina (marne argilloso-siltose e argille siltose), e al tetto sedimenti grossolani quaternari di origine fluvioglaciale e alluvionale (Figura 13).

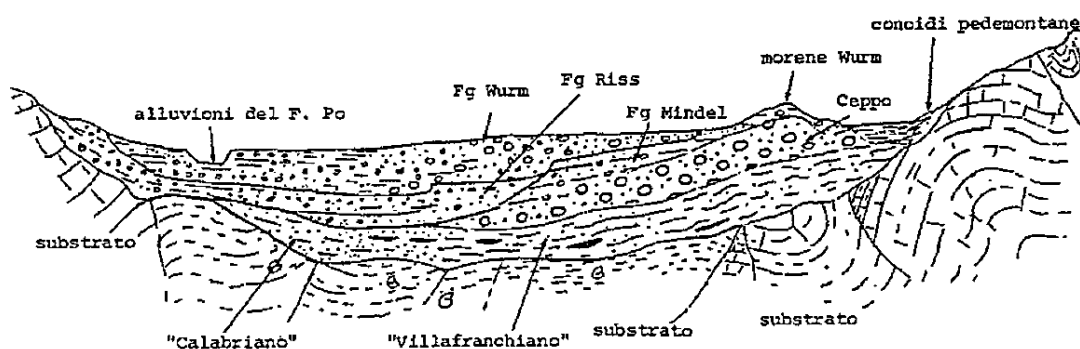


Figura 13. Schema geologico delle principali unità che costituiscono la Pianura Padana, secondo l'interpretazione tradizionale (da: Francani, 1997).

Per quanto riguarda l'area di studio, questa è costituita prevalentemente da formazioni continentali pleistoceniche ed oloceniche. Affioramenti diretti di rocce pre-quaternarie non si conoscono se non in sezione lungo le incisioni fluviali dei corsi d'acqua della zona, dove è possibile osservare un conglomerato appartenente al Ceppo. Solo nella ristretta zona collinare situata nei pressi di San Colombano al Lambro si distribuiscono limitati lembi di formazioni più antiche mioceniche di origine marina dove affiorano per motivi tettonici (Formazione di San Colombano e Marne di Sant'Agata Fossili). La rappresentazione semplificata della geologia caratterizzante la Pianura Lombarda è illustrata in Figura 14.

La Formazione di San Colombano (Calabriano – Pliocene superiore) è costituita da sabbie ben stratificate con intercalazioni argillose e da un conglomerato con abbondante macrofauna a prevalenza di lamellibranchi, brachiopodi, coralli e

gasteropodi (Anfossi et al., 1971). Le Marne di Sant'Agata Fossili (risalenti al Tortoniano) sono caratterizzate da marne argillose in strati fortemente inclinati con intercalazioni e lenti sabbiose e ghiaiose, con rari macrofossili, di spessore circa un metro (Anfossi et al., 1971). L'alto strutturale di San Colombano rappresenta la culminazione di strutture sepolte costituite da marne con intercalazioni arenacee ed argillose attribuite al Miocene (23.8-5.3 MA), e da sovrastanti depositi argillosi e sabbiosi (Desio, 1965). I depositi würmiani (*Fluvioglaciale e Fluviale del Würm*, risalenti al Pleistocene superiore), a differenza di quelli più antichi rissiani e mindelliani, costituiscono gran parte del territorio in esame, e sono caratterizzati genericamente da ghiaie e sabbie in matrice limosa con locali lenti argillose. Essendo molto permeabili, sono dei sedimenti che permettono l'alimentazione degli acquiferi sottostanti. Oltre a questa tipologia di depositi, anche se in minor estensione, sono presenti:

- *Fluvioglaciale, Fluviale e Lacustre del Riss*, depositi eterogenei formati da ghiaie, sabbie e argille ferrettizzate (Pleistocene medio).
- *Fluvioglaciale, Fluviale e Lacustre del Mindel*, costituiti da ghiaie, limi e argille ferrettizzate (Pleistocene inferiore).

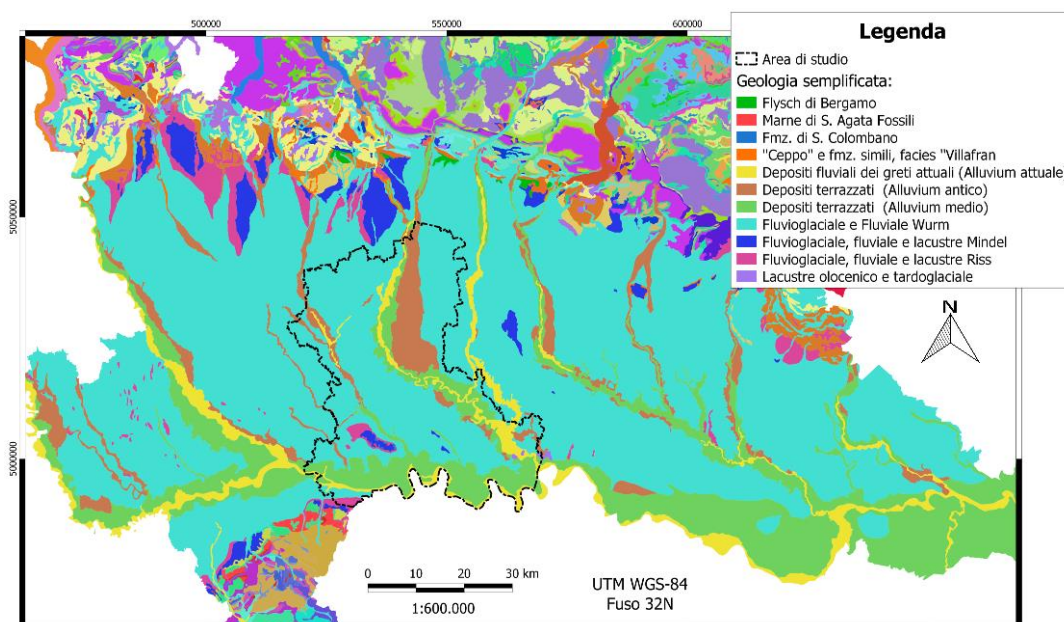


Figura 14. Geologia semplificata della Pianura Lombarda (fonte: Geoportale Regione Lombardia).

Il substrato di origine marina tende ad innalzarsi al di sopra del piano generale della pianura nei pressi del Colle di San Colombano (Desio, 1965; Pieri & Groppi, 1981), determinando il progressivo assottigliamento dei depositi alluvionali (Ariati et al., 1988; Guffanti et al., 2010), come mostrato in Figura 15. La sequenza continentale assume spessori variabili in funzione della presenza delle strutture sepolte, modellate nel basamento marino e localizzate in corrispondenza dei fronti di sovrascorrimenti appenninici (Braga & Cerro, 1988; Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002).

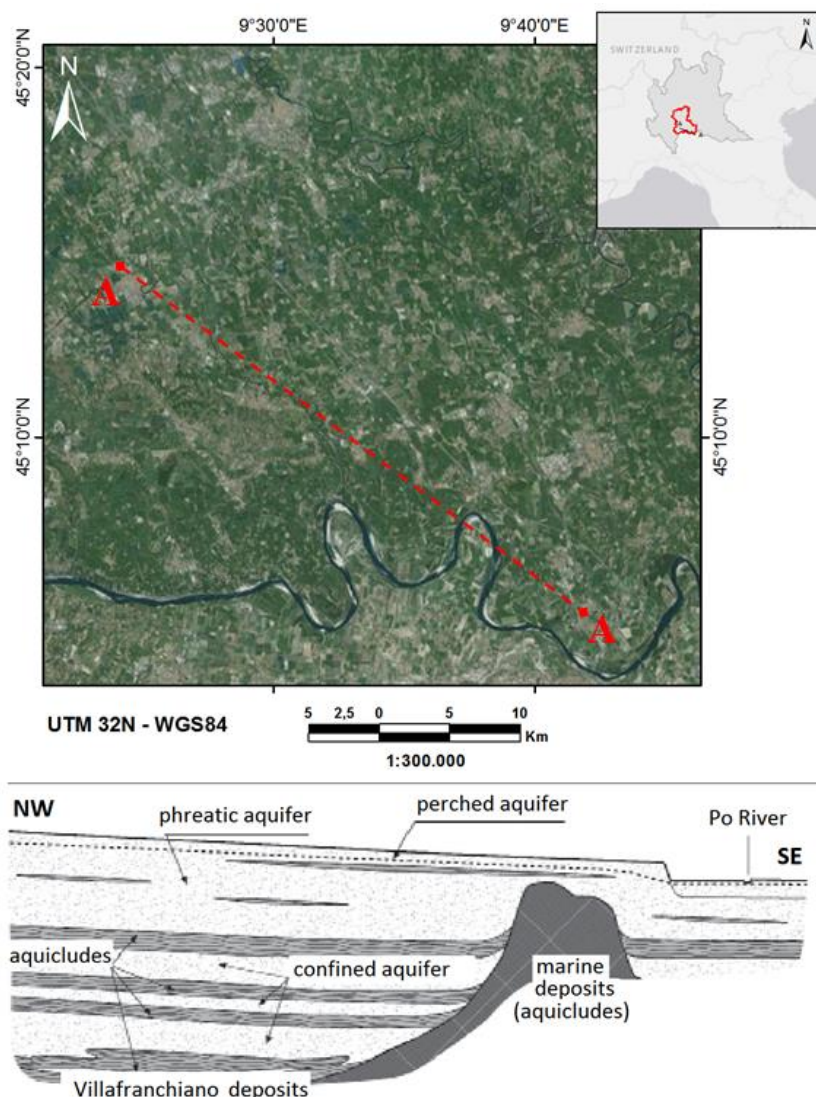


Figura 15. Sezione del sottosuolo della Pianura Lodigiana: innalzamento del substrato di origine marina e conseguente assottigliamento dei depositi alluvionali (modificato: Guffanti et al., 2010).

2.5. CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE GENERALI

La maggior parte degli acquiferi della Regione Lombardia sono contenuti nei depositi pleistocenici che caratterizzano la Pianura Lombarda, sia di origine continentale che marina (Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002). Il sottosuolo del Bacino Padano, importante e complesso serbatoio acquifero, costituisce una delle maggiori riserve idriche d'Europa (Perego et al., 2012) che ha motivato l'interesse scientifico nella ricerca e protezione della risorsa, nel quale è possibile rinvenire acquiferi di falda sfruttabili a scopo idropotabile fino a 200 m di profondità dal piano di campagna. Nel corso degli ultimi vent'anni numerosi studi hanno previsto la descrizione della struttura idrogeologica del sottosuolo padano utilizzando differenti approcci, dall'analisi delle caratteristiche litologiche e stratigrafiche (Ori, 1993; Amorosi & Farina, 1995; Vittori & Ventura, 1995; Amorosi et al., 1996, 1999; Bertotti et al., 1997; Bini, 1997, 2004; Muttoni et al., 2003; Amorosi & Colalongo, 2005; Scardia et al., 2006; Amorosi, 2008) ai criteri idrostratigrafici e idrogeologici (IRSA-CNR, 1981; Beretta, 1987; Beretta et al., 1991; Barrocu & Civita, 2004; Zuppi & Sacchi, 2004; Bersezio et al., 2004; Civita, 2008). Seppure con diversi accenti ed interpretazioni, complessivamente è stato messo in evidenza il carattere tendenzialmente regressivo della successione sedimentaria plio-pleistocenica in cui alla base sono presenti depositi torbiditici di mare profondo, ricoperti da un prisma sedimentario progradante.

Ai fini idrogeologici, nel sottosuolo dell'area lombarda sono state riconosciute tre litozone (unità stratigrafiche) che, dal più antico al più recente, hanno caratteri granulometrici decrescenti (Martinis & Mazarella, 1971; Francani & Pozzi, 1981; Avanzini et al., 1995):

- ***Litozona ghiaioso-sabbiosa***

Nella parte più superficiale, in prossimità del piano campagna, si incontra l'*Unità ghiaioso-sabbiosa*, caratterizzata da ghiaie e sabbie con rare lenti argillose di limitato spessore ed estensione, che aumentano a S creando falde confinate o semiconfinate superficiali. Generalmente, tale unità è sede di un acquifero libero alimentato principalmente dall'infiltrazione

superficiale delle acque meteoriche e irrigue (permeabilità molto elevata). Al di sotto di essa si trovano le più antiche *Unità ghiaioso-sabbioso-limosa*, caratterizzata da ghiaie e sabbie immerse in una matrice limoso-argillosa, ed *Unità conglomeratica*, molto più frequente nel settore orientale e settentrionale della pianura, le cui caratteristiche idrauliche variano in base al loro grado di cementazione e fratturazione.

La prevalenza di livelli limoso-argillosi alternati a sedimenti più grossolani, determinano la presenza di falde semi-confinata e localmente confinata, con uno spessore medio variabile da 90-100 m nel settore settentrionale ai 20-40 m in quello meridionale. Gli affioramenti sono concentrati soprattutto nelle aree pedemontane e di alta pianura, formando dei terrazzi; gli acquiferi in essa contenuti sono separati da quello sovrastante da diaframmi scarsamente permeabili costituiti da limi e argille. Gli acquiferi più produttivi e di maggiore estensione areale si localizzano nella porzione sommitale e sono quelli maggiormente sfruttati ad uso idropotabile. L'insieme degli acquiferi contenuti in questa unità viene identificato come *acquifero tradizionale*, anche se nella realtà questo complesso è formato da un *sistema multifalda* che viene assimilato ad un acquifero monostrato.

- ***Litozona sabbioso-argillosa***

Rappresentata dall'*Unità sabbioso-argillosa (facies continentali e di transizione)*, è formata in prevalenza da argille e limi di colore grigio e giallo (depositi villafranchiani), con frequenti orizzonti torbosi e intercalazioni sabbiose, talora più grossolane. Costituisce il substrato della falda acquifera tradizionalmente sfruttata. Nei livelli sabbiosi o, più raramente, sabbioso-ghiaiosi sono presenti falde confinate profonde di limitata produttività, che traggono la loro alimentazione dalle aree poste più a N e dallo scambio con gli acquiferi soprastanti, laddove i setti argillosi di separazione sono discontinui; lo spessore più rilevante di tale unità si attesta a valori variabili tra 100 e 200 m.

- ***Litozona argillosa***

Costituita dall'*Unità argillosa (facies marina)*, è formata prevalentemente da argille e limi di colore grigio-azzurro ricche in fossili marini, con intercalazioni sabbiose, talora cementate. L'unità si rinviene nei pozzi profondi oltre 220-280 m nella Media Pianura e 130 m nell'Alta Pianura (Calabriano – Pleistocene inferiore).

Di seguito si riporta una rappresentazione schematica che illustra i rapporti stratigrafici tra le diverse unità idrogeologiche (Figura 16).

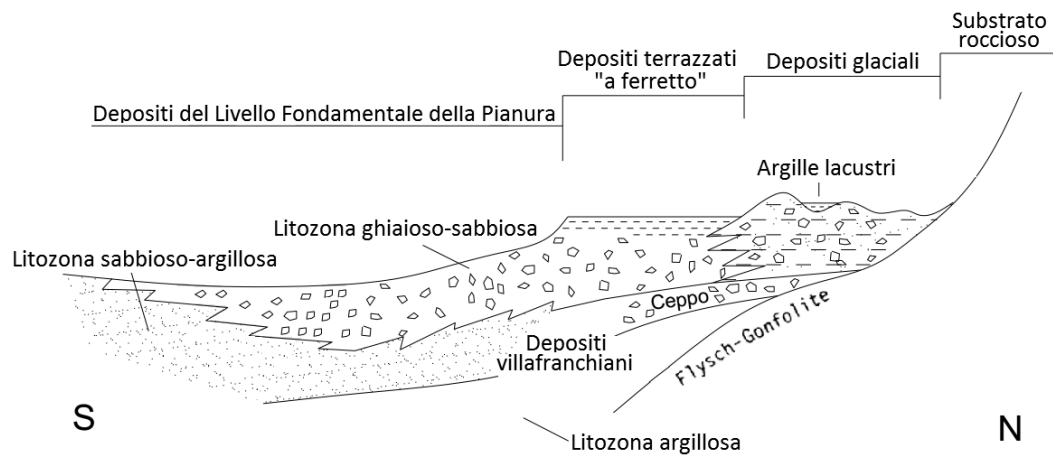


Figura 16. Rappresentazione schematica dei rapporti stratigrafici delle principali unità idrogeologiche del sottosuolo padano lungo un'ipotetica sezione N-S (modificato: Cavallin et al., 1984).

In base alle caratteristiche della struttura del sottosuolo e della permeabilità degli strati superficiali, il Programma di Tutela ed Uso delle Acque individua, nella Pianura Lombarda, le seguenti aree idrogeologiche (Regione Lombardia, 2006):

- ***Zona di ricarica delle falde (parte pedemontana)***, corrispondente alle alluvioni oloceniche e ai sedimenti fluvioglaciali pleistocenici nella parte settentrionale della pianura, dove l'acquifero è praticamente ininterrotto da livelli poco permeabili. L'area si estende a monte della fascia delle risorgive, nelle quali l'infiltrazione meteorica da piogge, nevi e irrigazioni, permette la ricarica della prima falda, dalla quale avviene la ricarica di quelle profonde.

- ***Zona di non infiltrazione alle falde***, sempre nella parte alta della pianura, è costituita dalle aree in cui affiora il substrato roccioso impermeabile o dove è presente una copertura argillosa (depositi fluvioglaciali del Pleistocene medio).
- ***Zone ad alimentazione mista***, collocata nella zona centrale e meridionale della pianura, in cui le falde superficiali sono alimentate solo localmente. La separazione con la falda profonda per la presenza di diaframmi poco permeabili, impedisce l'afflusso e, quindi, non vi è ricarica alle falde più profonde. Comprende gran parte della Pianura Lombarda.
- ***Zona di interscambio tra falde superficiali e profonde***, in corrispondenza dei corsi d'acqua principali, in particolar modo nel fiume Po.

La struttura idrogeologica del territorio lombardo è caratterizzata da una netta distinzione tra l'area di pianura e l'area montana. In riferimento alle litologie presenti, alla disposizione geometrica nonché ai fenomeni di circolazione idrica sotterranea, sono distinti tre complessi acquiferi principali, separati da livelli impermeabili continui ed estesi (Martinis & Mazzarella, 1971; Francani & Pozzi, 1981; Regione Lombardia, 2006; ISPRA, 2015b):

- ***Acquifero tradizionale***, è quello superiore, rappresentato dalle unità ghiaioso-sabbiosa, sabbioso-ghiaiosa e conglomeratica (depositi fluvioglaciali del Wurm, Riss e Mindel e depositi del Ceppo), comunemente sfruttato dai pozzi pubblici. La base di tale acquifero è generalmente definita dai depositi Villafranchiani.
- ***Acquifero profondo***, costituito dai livelli permeabili presenti all'interno dei depositi continentali del Pleistocene inferiore, a sua volta suddiviso in quattro corpi acquiferi minori.
- ***Terzo acquifero***, comprende una serie di livelli acquiferi presenti nelle argille marine, solo sporadicamente presente nelle sezioni stratigrafiche.

All'interno dell'acquifero tradizionale viene distinto un acquifero freatico superficiale, presente fino ad una profondità di 40-45 m dal piano campagna

(generalmente, nel territorio prossimo all'area di studio, la superficie piezometrica si attesta a pochi metri di profondità dalla superficie topografica, con un moto in direzione NW-SE), ed uno semiconfinato sottostante (con profondità variabile tra 80 e 120 m dal piano campagna), separato dal precedente tramite lenti poco permeabili (*aquitard*) di spessore variabile (da 5 a 20 m), spesso discontinue. La suddivisione dei sedimenti che costituiscono l'acquifero lombardo in unità idrostratigrafiche proposta da Regione Lombardia & ENI-AGIP (2002), identifica e distingue i cosiddetti "*Gruppi Acquiferi*", definiti da barriere di permeabilità ad estensione regionale (Figura 17).

Queste unità idrostratigrafiche, a partire dal piano campagna, sono così denominate:

- ***Gruppo Acquifero A***, sfruttato in Lombardia in modo intensivo seppure spesso interessato da fenomeni di inquinamento. Corrisponde alla porzione più superficiale dell'acquifero tradizionale (litozona ghiaioso-sabbiosa). Si presenta generalmente libero.
- ***Gruppo Acquifero B***, corrisponde alla porzione di acquifero tradizionale più profonda, generalmente confinato o semi-confinato (litozona sabbioso-ghiaiosa e conglomeratica). Insieme al Gruppo Acquifero C, è sfruttato nell'area marginale del bacino.
- ***Gruppo Acquifero C***, rappresenta l'acquifero profondo della litozona sabbioso-argillosa (Villafranchiano). Assieme al Gruppo Acquifero B, è sfruttato nell'area marginale del bacino.
- ***Gruppo Acquifero D***, corrisponde all'acquifero profondo della litozona argillosa. Risulta isolato rispetto alla superficie ed è sfruttato solo localmente.

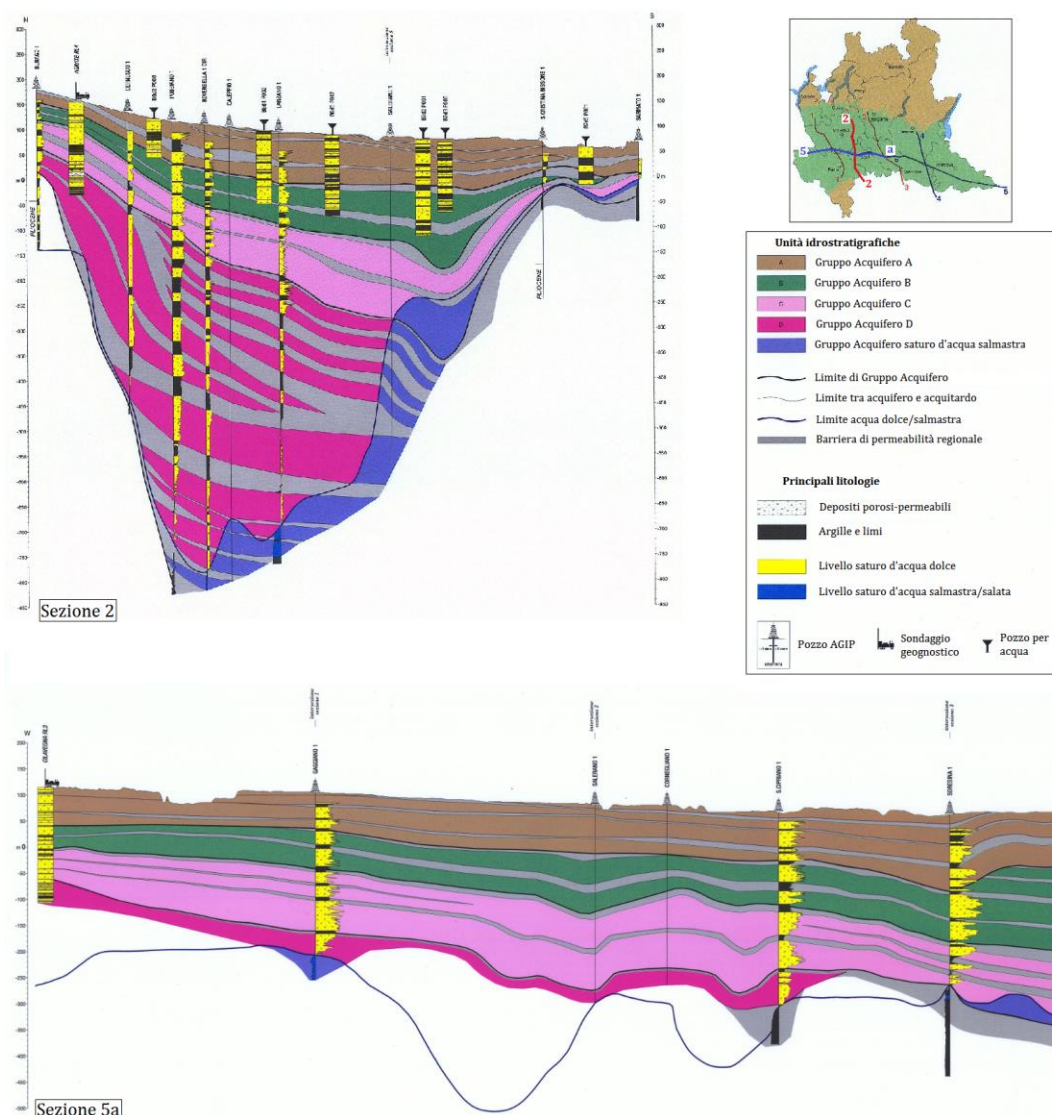


Figura 17. Sezioni idrostratigrafiche che mostrano la stratigrafia di sottosuolo del Bacino Padano (da: Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002).

Dai lavori di Martinis & Mazzarella (1971), Francani & Pozzi (1981), Avanzini et al. (1995) e Regione Lombardia & ENI-AGIP (2002), è possibile ricavare la descrizione delle caratteristiche idrogeologiche del sottosuolo della Pianura Lombarda: lo schema dei rapporti stratigrafici tra i Gruppi Acquiferi è riportato in Figura 18.

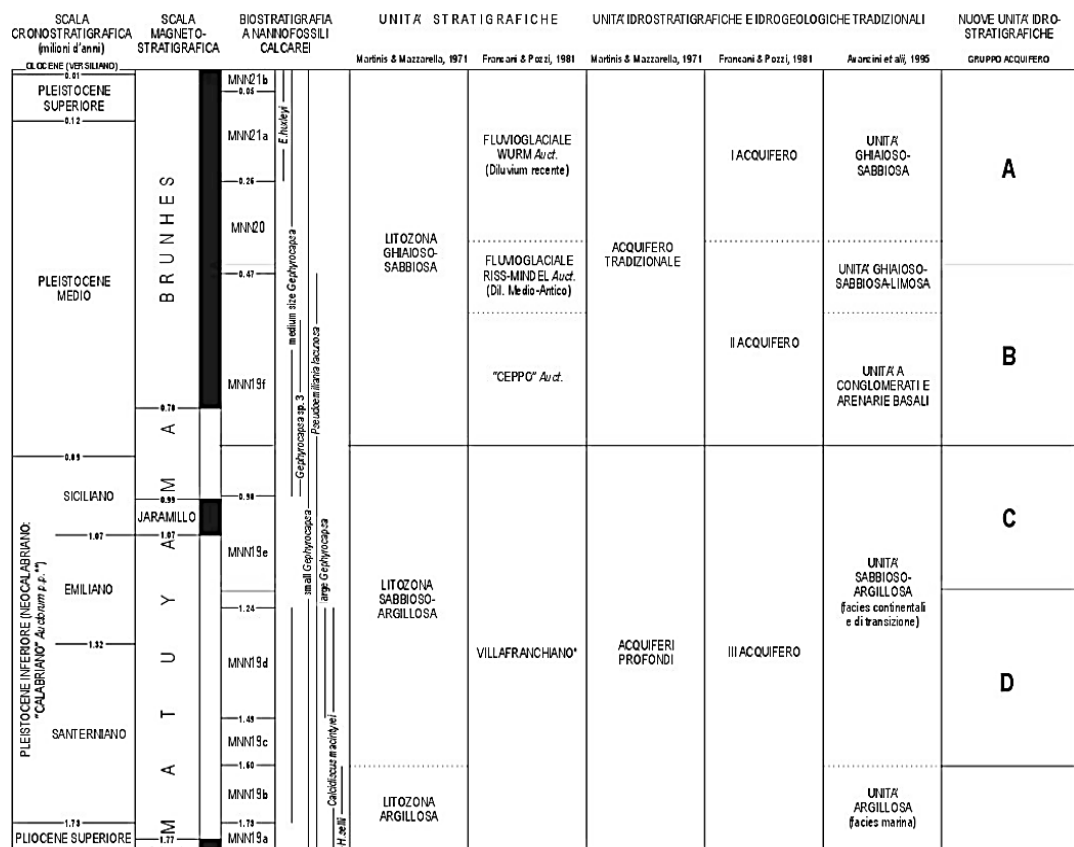


Figura 18. Quadro stratigrafico complessivo e classificazione dei Gruppi Acquiferi del sottosuolo della Pianura Padana (da: Regione Lombardia & ENI-AGIP, 2002).

Capitolo 3

MATERIALI

La procedura di studio, per ricavare le mappe di tessitura del suolo nudo, ha previsto l'utilizzo di dati di vario tipo: prodotti del telerilevamento (ottico multispettrale), mappe presenti in letteratura o prodotte dalla pubblica amministrazione e dati in situ (firme spettrali).

I dati telerilevati utilizzati in questo elaborato, sono quelli dei satelliti della costellazione Landsat.

3.1. IMMAGINI SATELLITARI LANDSAT

3.1.1. Cenni sul telerilevamento

Il termine telerilevamento (dall'inglese Remote Sensing – RM) indica la raccolta di informazioni qualitative e quantitative su superfici, fenomeni ambientali e oggetti mediante dei sensori non in contatto diretto con essi (Gomasca, 2010), sfruttando l'informazione contenuta in un'onda elettromagnetica (Mantovani & Marcolongo, 1992; Zilioli et al., 1992; Brivio et al., 1993; Galati & Gilardini, 2000; Taramelli et al., 2010). È una disciplina tecnico-scientifica che prevede la misura della radiazione elettromagnetica emessa (*radianza*) o riflessa (*riflettanza*) dalle superfici in esame. Misurare l'energia elettromagnetica significa quantificare le alterazioni che la superficie impone alla radiazione, ovvero alle sue caratteristiche di intensità, frequenza e polarizzazione, processo che si traduce nella conoscenza fisica dell'oggetto. Queste misurazioni sono restituite sotto forma di immagini raster (formate da *pixel*, elementi fondamentali che compongono le immagini digitali), risultanti dall'elaborazione di dati numerici, e sono rilevate da appositi sensori remoti che registrano l'informazione di intensità dell'energia riflessa come valore numerico all'interno dei pixel (*Digital Number – DN*). Le radiazioni elettromagnetiche sono classificate in funzione della lunghezza d'onda: sono così individuate diverse *bande spettrali*, il cui insieme prende il nome di *spettro elettromagnetico* (Figura 19).

Anche se la realtà fisica dello spettro nella distribuzione dei vari tipi di energia è a tutti gli effetti continua, per convenzione è possibile adoperare una suddivisione in bande spettrali ordinata per lunghezze d'onda λ crescenti (Brivio et al., 2006).

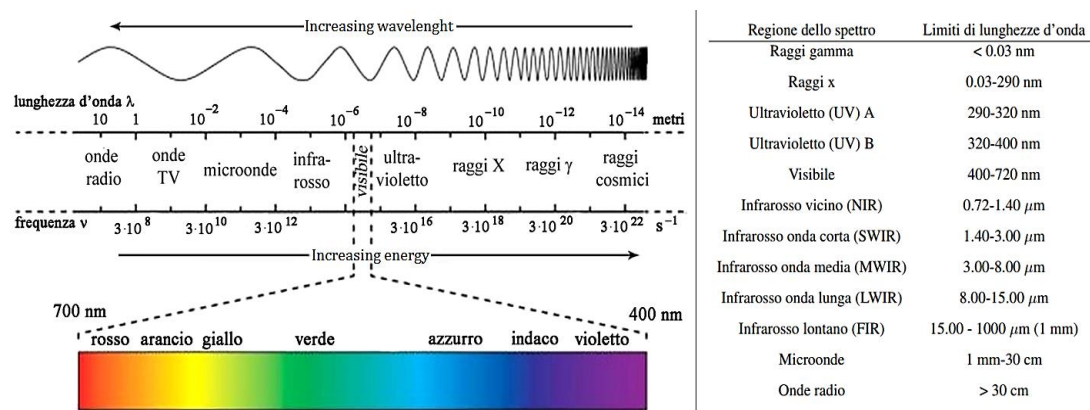


Figura 19. Regioni dello spettro elettromagnetico e specifiche delle principali bande spettrali.

I sensori *passivi (ottici)*, sono una strumentazione in grado di ricevere e misurare l'intensità con cui è riflessa l'energia elettromagnetica proveniente dal Sole: la riflessione avviene quando un raggio luminoso incide su una superficie non trasparente e viene diretto in un'altra direzione. Questi sistemi risultano strettamente legati alle condizioni meteorologiche poiché, in presenza di corpi nuvolosi, le radiazioni VIS (visibile), NIR (infrarosso vicino) e TIR (infrarosso lontano), frequenze tipiche degli strumenti ottici, non giungono al suolo (Gomasca, 2004). Prima di raggiungere la superficie terrestre, la radiazione solare attraversa l'atmosfera: della radiazione incidente totale, parte viene riflessa verso l'alto, parte viene assorbita e riemessa, ed una parte viene diffusa. I sensori passivi registrano la porzione di radiazione riflessa dalle superfici rispetto alla radiazione totale incidente, rapporto definito con il termine di riflettanza (Lillesand et al., 2014).

Il principio su cui si fonda il telerilevamento passivo è la capacità di differenziare il maggior numero possibile di elementi sul territorio (suolo, vegetazione, acqua, urbanizzato ecc.) grazie al loro differente comportamento radiometrico (spettrale caratteristico), analizzando le loro caratteristiche nello spettro elettromagnetico alle diverse lunghezze d'onda a cui sono sensibili i sensori (Sartori, 2001).

Siccome per ogni corpo sulla superficie terrestre può essere stabilita la *firma spettrale* (o *curve della risposta spettrale*), che mostra la frazione della radiazione incidente riflessa come funzione della lunghezza d'onda, è possibile ottenere informazioni sulle caratteristiche delle superfici analizzate, pertanto, è anche possibile distinguere determinati oggetti in base alle loro proprietà spettrali (Gomasasca, 1998, 2004; Sartori, 2001). In Figura 20 viene riportato un esempio in cui sono posti a confronto gli andamenti della riflettanza per diverse superfici: ogni copertura dispone di una propria firma spettrale caratterizzata da un preciso andamento della riflettanza, con dei valori massimi e minimi localizzati in specifici intervalli di lunghezze d'onda.

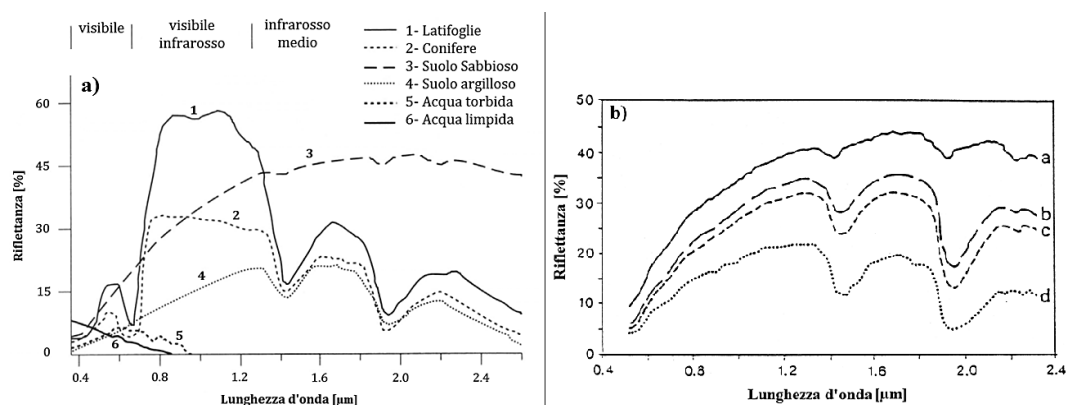


Figura 20. a) *Firme spettrali di alcuni elementi naturali presenti sulla superficie terrestre (da: Gomasasca, 2004); b) suolo a differenti contenuti idrici (da: Baumgardner, 1985).*

La riflettanza dei suoli nudi dipende dalla loro composizione fisica. Anche il colore superficiale, che è un utile indicatore del tipo di suolo e delle sue proprietà (anch'esso dipendente dai parametri sopracitati). L'effetto dell'umidità sulla risposta spettrale delle formazioni pedologiche è quello di ridurre l'intensità della firma, non modificandone l'andamento (Baumgardner et al., 1985). Diversi autori hanno studiato una grande quantità di spettri e hanno determinato un numero elevato di curve rappresentative della variazione della riflettanza dei suoli (Stoner & Baumgardner, 1981; Kasumov et al., 1992). Inoltre, secondo Mulders (1987), Irons et al. (1989), Coleman et al. (1991), Lillesand & Kiefer (1994) e Croft et al. (2012), le più importanti proprietà del suolo, per quanto riguarda il

comportamento spettrale, sono l'umidità (soil moisture), il contenuto di sostanza organica, la tessitura, la struttura, il contenuto di ferro, la composizione mineralogica, la tipologia di minerali argillosi e la rugosità superficiale del suolo. Il contenuto idrico del suolo è strettamente legato alla composizione granulometrica, e quindi alla tessitura: ad esempio, suoli sabbiosi grossolani sono tipicamente ben drenati, perciò sono caratterizzati da un'umidità inferiore ed una più intensa riflettanza rispetto a quelli argillosi (Novák et al., 2013).

I dati RM Landsat utilizzati in questo studio sono stati acquisiti da due differenti sensori satellitari ottici multispettrali (numero di bande < 10): *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) del satellite Landsat-7 e *Operational Land Imager* (OLI) del Landsat-8.

3.1.2. Missione Landsat (Land Satellite Mission)

La missione Landsat è un programma satellitare di osservazione della Terra che ha previsto la realizzazione di un importante dataset di dati ottici multispettrali della superficie terrestre, a partire dal 1972, creando il primo archivio storico di immagini telerilevate a media risoluzione spaziale (USGS, 2007). Il progetto nasce da un'iniziativa tra USGS (United States Geological Survey) e la NASA (National Aeronautics and Space Administration), con l'intento iniziale di supportare le pianificazioni strategiche governative e militari. La missione ha previsto il susseguirsi di un gran numero di satelliti, l'ultimo dei quali, attualmente in orbita, è la piattaforma Landsat-8 (Figura 21). Le traiettorie seguite sono polari, con un piano circa perpendicolare a quello equatoriale terrestre (*orbita eliosincrona*, osservazione della Terra quando questa è illuminata dal Sole), un'inclinazione di 98.2° rispetto al piano equatoriale, un'altitudine di 705 km, una velocità di 7.5 km/s e un periodo dell'orbita di circa 99 minuti. Il loro tempo di rivisitazione nella stessa porzione di territorio è di 16 giorni.

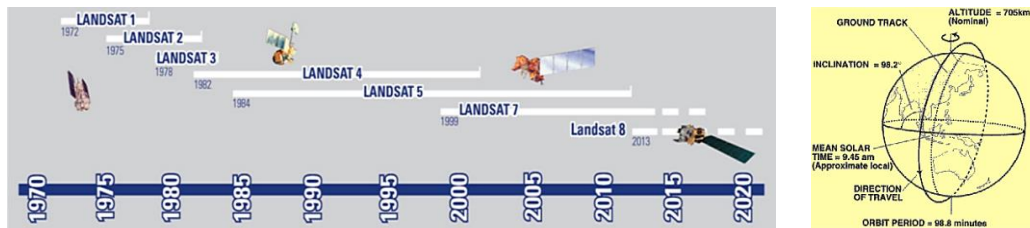


Figura 21. Landsat Mission Timeline (satelliti lanciati a partire dal 1972) e loro orbite.

La parte di processamento di questa tesi ha previsto l'analisi dei dati satellitari di due dataset diversi, ottenuti dalle missioni Landsat-7 (L7) e Landsat-8 (L8). Si sottolinea che i due satelliti in questione hanno un tempo di rivisitazione identico, ma montando sensori diversi, presentano una risoluzione spettrale differente (Tabella 2 e Figura 22). Analizzando nel dettaglio le caratteristiche tecniche delle piattaforme, il satellite L7 acquisisce mediante il sensore ETM+, il quale, a causa di un guasto permanente allo Scan Line Corrector (SLC), strumento che compensa per il moto oscillatorio del satellite (da qui la dicitura presente nel nome dell'archivio "L7, SLC-off") produce un effetto di *striping* che risulta in linee per le quali non vengono acquisiti dati, con perdita di informazioni che aumenta gradualmente avvicinandosi ai bordi dell'immagine (*gaps*, strisce nere in cui non viene acquisita nessuna informazione; USGS, 2007). Il malfunzionamento della strumentazione SLC risulta in una perdita di informazioni approssimativamente del 22% rispetto ad una scena normale (Storey et al., 2005). Il satellite L8 monta, invece, due tipologie di strumenti, il sensore OLI e il TIRS (Thermal Infrared Sensor; USGS, 2015), ma per il nostro studio sono state utilizzate solo le informazioni prodotte dal primo strumento. L'utilizzo di sensori differenti implica delle risoluzioni spettrali diverse: il satellite L7 colleziona immagini che presentano 7 bande in cui registrano l'energia riflessa ed 1 canale per l'energia emessa dalla superficie terrestre, corrispondente al canale del termico (TIR), mentre il satellite L8 considera 9 bande spettrali nel campo delle onde corte (shortwave) più 2 nel termico (TIRS).

Landsat-7 ETM+				Landsat-8 OLI/TIRS			
Banda	λ (μm)	Risoluzione (m)		Banda	λ (μm)	Risoluzione (m)	
				1	Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	30
1	Blue	0.441 - 0.514	30	2	Blue	0.452 - 0.512	30
2	Green	0.519 - 0.601	30	3	Green	0.533 - 0.590	30
3	Red	0.631 - 0.692	30	4	Red	0.636 - 0.673	30
4	NIR	0.772 - 0.898	30	5	NIR	0.851 - 0.879	30
5	SWIR-1	1.547 - 1.749	30	6	SWIR-1	1.566 - 1.651	30
6	TIR	10.310 - 12.360	60	10	TIR-1	10.600 - 11.190	100
				11	TIR-2	11.500 - 12.510	100
7	SWIR-2	2.064 - 2.345	30	7	SWIR-2	2.107 - 2.294	30
8	Pan	0.515 - 0.896	15	8	Pan	0.503 - 0.676	15
				9	Cirrus	1.363 - 1.384	30

Tabella 2. Confronto delle specifiche tecniche delle bande spettrali del satellite L7 (ETM+) e quelle del satellite L8 (OLI/TIRS; da: USGS, 2007; USGS, 2015).

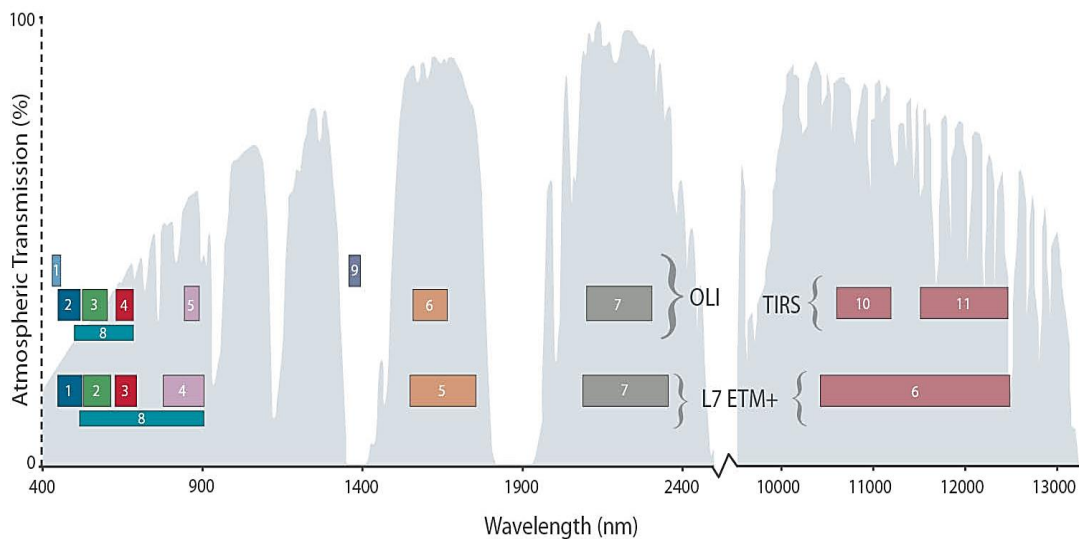


Figura 22. Schematizzazione delle bande spettrali dei sensori OLI e TIRS del satellite L8 comparate con quelle del sensore ETM+ del satellite L7 (da: USGS, 2007; USGS, 2015).

L'acquisizione delle immagini da due piattaforme diverse ha determinato l'analisi di scene non aventi un extent di dimensioni identiche: infatti, (185 km x 170 km) per le immagini L7, mentre (190 km x 180 km) per quelle L8 (Figura 23). Di conseguenza, per procedere all'elaborazione delle immagini L7, contrariamente alle L8, è stato necessario realizzare il mosaico di alcune immagini per disporre di un'acquisizione che comprendesse l'intera area di studio.

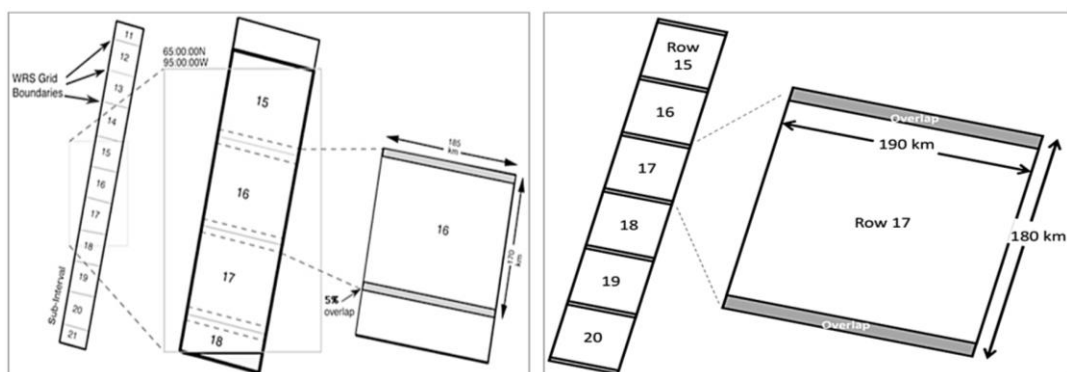


Figura 23. Landsat Product: notare le differenti dimensioni delle scene, L7 a sinistra e L8 a destra (da: <http://landsat.usgs.gov>; USGS, 2015).

I dati RM usati in questa tesi sono quelli acquisiti dalle piattaforme satellitari L7 e L8 relativi a due specifici anni, 2012 e 2015 (arco temporale considerato sufficiente per visualizzare i cambiamenti nell'uso e nella copertura dei suoli), rispettivamente le immagini del dataset L7 nel primo caso, mentre quelle dell'archivio L8 nel secondo. Per l'analisi multitemporale sono state utilizzate 5 immagini ottiche, accuratamente selezionate dagli archivi Landsat dell'USGS al fine di non avere acquisizioni con copertura nuvolosa. Le acquisizioni sono state scaricate direttamente dal portale Earth Explorer dell'USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>): per l'anno 2012, le immagini L7 dell'archivio "L7 ETM+ SLC-off (2003-present)" dei mesi di marzo e aprile, mentre per l'anno 2015, quelle L8 dell'archivio "L8 OLI/TIRS" dei mesi di gennaio, aprile e maggio. Nello specifico:

- n. 2 immagini del sensore ETM+ (L7), datate: 15/03/2012 e 25/04/2012;
- n. 3 immagini del sensore OLI (L8), datate: 04/01/2015, 01/04/2015 e 28/05/2015.

Per l'analisi dei dati, sia L7 che L8, sono state considerate solo le bande con la stessa risoluzione al suolo (30 m) e di interesse per fare habitat mapping e uso/copertura del suolo (ovvero le bande b1, b2, b3, b4, b5 e b7 del il satellite L7, mentre le bande b2, b3, b4, b5, b6 e b7 per la piattaforma L8). Tutti i dati Landsat sono inquadrati all'interno di un sistema di riferimento, noto come Worldwide Reference System (WRS), in modo tale che ogni immagine sia descritta dagli indici delle orbite (*path*) e dai centri della scena (*row*), a formare un grigliato

globale. Il termine row si riferisce alla latitudine della linea centrale che attraversa il frame di un'immagine lungo ogni path (che indica la traiettoria del satellite). Le immagini Landsat hanno subito un pre-processamento da parte dell'USGS che ha previsto delle correzioni geometriche e radiometriche, oltre ad una rettifica al terreno (L1T – Level 1 Terrain corrected product).

In Tabella 3 e Tabella 4 sono riportati i dettagli delle scene utilizzate e il confronto delle specifiche tecniche delle bande spettrali considerate.

Landsat-7 ETM+	15 MARZO 2012			
	Projection system	WGS-84 UTM 32N	Projection system	WGS-84 UTM 32N
	Data Source	USGS	Data Source	USGS
	Ground resolution	30m x 30m	Ground resolution	30m x 30m
	WRS_Path	194	WRS_Path	194
	WRS_Row	028	WRS_Row	029
	Acquisition date	15 March 2012	Acquisition date	15 March 2012
	Sun azimuth	151.45480416°	Sun azimuth	150.39606873°
	Sun elevation	38.27199815°	Sun elevation	39.37310061°
	File name	LE71940282012075ASN00	File name	LE71940292012075ASN00
	25 APRILE 2012			
	Projection system	WGS-84 UTM 32N	Projection system	WGS-84 UTM 32N
	Data Source	USGS	Data Source	USGS
	Ground resolution	30m x 30m	Ground resolution	30m x 30m
WRS_Path	193	WRS_Path	193	
WRS_Row	028	WRS_Row	029	
Acquisition date	25 April 2012	Acquisition date	25 April 2012	
Sun azimuth	147.18965273°	Sun azimuth	145.47184315°	
Sun elevation	53.51020925°	Sun elevation	54.53196579°	
File name	LE71930282012116EDC00	File name	LE71930292012116EDC00	
Landsat-8 OLI	04 GENNAIO 2015		28 MAGGIO 2015	
	Projection system	WGS-84 UTM 32N	Projection system	WGS-84 UTM 32N
	Data Source	USGS	Data Source	USGS
	Ground resolution	30m x 30m	Ground resolution	30m x 30m
	WRS_Path	193	WRS_Path	193
	WRS_Row	029	WRS_Row	029
	Acquisition date	04 January 2015	Acquisition date	28 May 2015
	Sun azimuth	160.37920857°	Sun azimuth	140.98816687°
	Sun elevation	20.41845552°	Sun elevation	62.35892165°
	File name	LC81930292015004LGN00	File name	LC81930292015148LGN00
	01 APRILE 2015			
	Projection system	WGS-84 UTM 32N		
	Data Source	USGS		
	Ground resolution	30m x 30m		
WRS_Path	194			
WRS_Row	028			
Acquisition date	01 April 2015			
Sun azimuth	151.74965282°			
Sun elevation	45.30931408°			
File name	LC81940282015091LGN00			

Tabella 3. Dettaglio delle immagini satellitari utilizzate.

Specifiche delle bande Landsat-7 ETM+						
	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
λ	0.479	0.561	0.661	0.835	1.650	2.208
fwhm	0.067	0.078	0.060	0.121	0.191	0.251
Specifiche delle bande Landsat-8 OLI						
	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
λ	0.482	0.560	0.660	0.835	1.650	2.208
fwhm	0.070	0.080	0.060	0.130	0.190	0.260

Tabella 4. Specifiche tecniche delle diverse bande considerate per procedere con l'analisi, con λ =lunghezza d'onda, e *fwhm*=Full Width at Half Maximum.

3.2. RADIOMETRIA DI CAMPO (FIRME SPETTRALI IN SITU)

La radiometria di campo è una tecnica tradizionalmente usata a supporto dell'analisi di immagini telerilevate da piattaforme aeree e satellitare, per realizzare una classificazione delle coperture più dettagliata (Deering, 1989; Leone et al., 2003). I dati in situ e da remoto sono stati raccolti simultaneamente il 28-29 maggio 2015 allo scopo di ottenere un quadro sinottico, nello stesso range temporale, dell'area studiata con informazioni di diversa natura. I dati di campo svolgono l'importante compito di *verità a terra*, non solo per la validazione e calibrazione dei prodotti da Earth Observation (EO), ma anche per ridefinire ed adattare eventualmente le metodologie impiegate. La collezione degli spettri di differenti tipologie di coperture (libreria spettrale), è un elemento molto importante per migliorare la capacità di mappatura completa da sistemi telerilevati (Taramelli et al., 2013b).

Le informazioni radiometriche di campo, costituite da firme spettrali delle principali tipologie di copertura, sono state raccolte durante la campagna di misurazione svolta il 29 maggio 2015 (data prossima al passaggio del satellite), presso i Comuni di Secugnago e Casalpusterlengo, in Provincia di Lodi (vedi Figura 24). La programmazione delle attività di campo ha previsto una fase iniziale di considerazione sui tempi delle operazioni e sulla logistica, in relazione alle condizioni climatiche. Il meteo ha una duplice valenza in quanto può determinare l'esito del programma di acquisizione dell'immagine satellitare e, allo stesso tempo, influenzare fortemente la qualità dei dati radiometrici di campo.

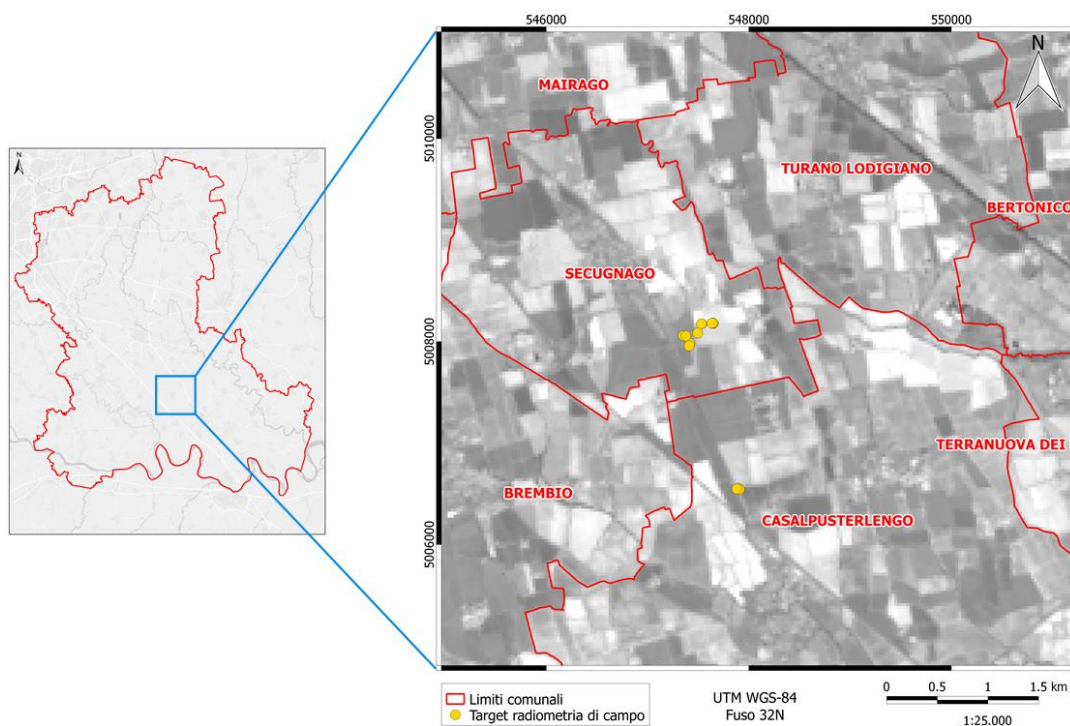


Figura 24. Localizzazione dei target della campagna radiometrica.

In corrispondenza della fine del mese di maggio, superata la prima metà della stagione primaverile, nelle aree agricole la vegetazione è in piena fase di crescita e, dal punto di vista quantitativo, i suoli nudi ricoprono una superficie molto limitata.

In Figura 25 è possibile osservare i target di suolo nudo rilevati durante la campagna di acquisizione delle firme, in cui è evidente la diversa colorazione dei terreni legata al differente contenuto idrico, mentre in Tabella 5 sono elencati i dettagli dei punti di campionamento della campagna radiometrica. In particolare, i target *SEG07*, *SEG08b* e *SEG10* sono le firme spettrali più rappresentative della radiometria di campo, utilizzati come punti di calibrazione/validazione per la classificazione delle coperture presenti nelle diverse acquisizioni satellitari.

L'umidità del terreno, ovvero la quantità di acqua contenuta nel terreno espressa in percentuale (di volume), è stata misurata con un'apposita sonda di terra.



Figura 25. Foto dei target di suolo nudo misurati durante la campagna di acquisizione delle firme spettrali: a sinistra il campione SEG07, mentre a destra il campione SEG08b. Notare la netta differenza di colore tra i due suoli, legata principalmente al diverso contenuto idrico.

Luogo di campionamento		Cod. target	LONGITUDE	LATITUDE	Descrizione	Umidità W_1
Provincia	Comune					
Provincia di Lodi	Secugnago	SEG01	9.606956	45.225495	terreno secco marrone chiaro	21.4
		SEG02	9.606870	45.225502	terreno secco marrone chiaro	19.7
		SEG03	9.606929	45.225535	mais	
		SEG04	9.606777	45.225515	terreno	24.1
		SEG05	9.605484	45.225461	terreno	23.3
		SEG06	9.605459	45.225466	terreno	17.9
		SEG07	9.604985	45.224651	terreno umido	36.3
		SEG08a	9.603982	45.223728	terreno	14.9
		SEG08b	9.603982	45.223728	terreno	18.5
		SEG09a	9.603156	45.224429	terreno	17.2
		SEG09b	9.603156	45.224429	terreno	23.2
	SEG10	9.603478	45.224402	vegetazione secca (gialla)		
	SEG11	9.603894	45.223525	asfalto		
	Casalpusterlengo	SEG12	9.609926	45.210862	terreno	21.7
SEG13		9.610066	45.210748	terreno	19	
SEG14		9.609764	45.210799	strada ghiaiosa		

Tabella 5. Dettaglio dei punti di campionamento.

Negli ultimi decenni, le misure di riflettanza spettrale eseguite con spettrofotometri e spettroradiometri, sono state ampiamente adoperate negli studi pedologici e hanno guadagnato notevole rilevanza nell'acquisizione di dati sia in laboratorio che in campo (Mulders, 1987; Ben-Dor, 2002).

La radiometria in situ ha previsto la misura delle radianze con uno spettroradiometro di campo, il cui focus era sui suoli nudi privi di vegetazione variando, ove possibile, tipologia di suolo, granulometria, tipo di aratura/movimentazione dei terreni. La riflettanza delle firme spettrali raccolte viene espressa in funzione lunghezza d'onda. La strumentazione di terra utilizzata è uno spettroradiometro di campo portatile in grado di acquisire l'energia radiante che opera nell'intervallo compreso tra la regione del VIS e quella del NIR (range

spettrale 0.39-0.93 μm). È uno strumento capace di misurare la riflettanza bi-direzionale a buona risoluzione spettrale, generalmente utilizzato per la caratterizzazione di suoli, rocce, minerali e vegetazione.

La spettrometria di campo rappresenta una tecnica passiva, non distruttiva per l'identificazione delle componenti superficiali fondamentali attraverso le caratteristiche diagnostiche di riflettanza ad elevata risoluzione spettrale. La nascita della spettrometria di campo risale agli anni cinquanta (Penndorf, 1956), in anticipo di diversi anni rispetto alla nascita dei sensori per l'osservazione della Terra, assumendo negli anni un ruolo importante nell'ambito del telerilevamento.

In campo, è possibile realizzare misure dettagliate di riflettanza bi-direzionale, su superfici di dimensioni variabili da qualche centimetro a diversi metri, utilizzando uno spettrometro portatile (Escadafal et al., 1993; Lesch, 2005). Questa tipologia di strumentazione consente una comprensione dei principi chimici e fisici della riflettanza del suolo e sono ampiamente utilizzati per tale scopo, consentendo di misurare, tracciare, riconoscere ed analizzare gli spettri di riflettanza (Clark, 1999).

I dati raccolti sono stati infine inseriti in una libreria spettrale finalizzata allo studio della relazione tra risposta radiometrica e caratteristiche superficiali dei suoli nudi.

3.3. DUSAF 4.0

Il DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali) è una banca dati geografica nata nel 2001 nell'ambito di un progetto promosso e finanziato congiuntamente dalla Direzione Generale Territorio e Urbanistica e dalla Direzione Generale Agricoltura della Regione Lombardia e realizzata dall'Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e alle Foreste (ERSAF) con la collaborazione dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Lombardia (ARPA), disponibile sul Geoportale della Regione Lombardia e scaricabile dal sito <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>.

L'ultima versione, aggiornata al 2012, prende il nome di “*DUSAF 4.0*” ed è stato ottenuto da fotointerpretazione delle foto aeree Agea del 2012, su tutto il territorio regionale. Il DUSAF è una carta tematica che rappresenta la base informativa di Uso e Copertura del Suolo (e del territorio).

La copertura del suolo è un concetto collegato ma distinto dall'uso del suolo. Per *copertura del suolo (Land Cover)* si intende la copertura biofisica della superficie terrestre, comprese le superfici artificiali, le zone agricole, i boschi e le foreste, le aree seminaturali, le zone umide e i corpi idrici, caratterizzando il suolo in base a ciò che effettivamente è presente sulla sua superficie (Thompson, 1996; Di Gregorio & Jansen, 1998; Anderson et al., 2001; Jansen & Di Gregorio, 2002). L'impermeabilizzazione del suolo costituisce la forma più evidente di copertura artificiale (ISPRA, 2015c). Complessivamente, la copertura del suolo comprende vegetazione, terreno nudo, corpi idrici e superfici artificiali, che possono essere osservate in campo e rilevate con tecniche di telerilevamento. L'*uso del suolo (Land Use)* è, invece, un riflesso delle interazioni tra l'uomo e la copertura del suolo e costituisce quindi una descrizione di come il suolo venga impiegato in attività antropiche (Thompson, 1996; Di Gregorio & Jansen, 1998; Anderson et al., 2001; Jansen & Di Gregorio, 2002; ISPRA, 2015c). Risulta essere una funzione socio-economica dell'area poiché è una descrizione di come viene sfruttato il territorio (attività antropiche in una land cover). L'uso urbano e agricolo sono due delle più conosciute classi di uso del suolo (Fisher et al., 2005). La classificazione del DUSAF segue una struttura gerarchica secondo macro-categorie e classi, che evidenzia l'influenza del fattore antropico sull'uso del suolo (Regione Lombardia & ERSAF, 2010a). Il I° livello comprende 5 classi generali che racchiudono le principali tipologie di copertura (aree antropizzate, aree agricole, territori boscati ed ambienti seminaturali, aree umide, corpi idrici; vedi Figura 26), che vengono sempre più differenziate nei successivi livelli. Le classi comprendono raggruppamenti omogenei d'uso del suolo per macro tipologie indicate tramite una sigla e, a loro volta, si suddividono in diverse sottoclassi in cui si dettagliano e si specificano le singole tipologie, indicate tramite una numerazione.

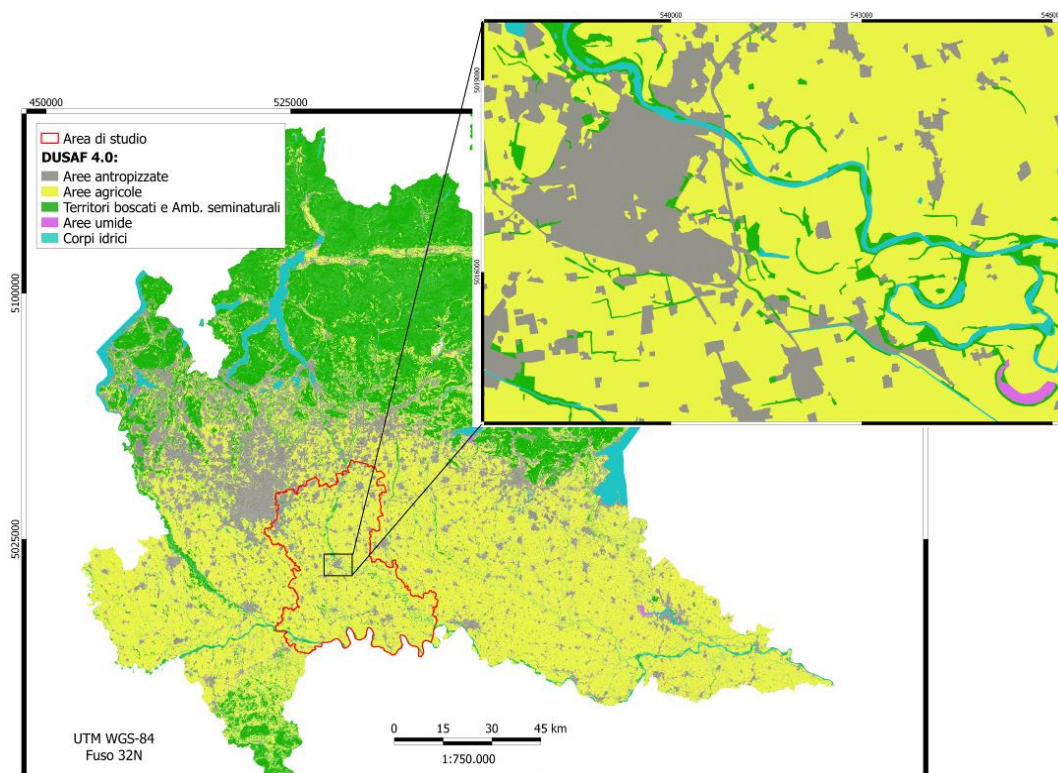


Figura 26. Carta della Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali della Regione Lombardia, dati 2012 (DUSAF 4.0; fonte: <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>).

3.4. CARTE PEDOLOGICHE (BASI INFORMATIVE DEI SUOLI)

La consultazione delle carte pedologiche (Basi Informative dei suoli della Regione Lombardia) ha avuto l'obiettivo di risalire alle informazioni pedologiche dell'area di studio, in particolare alle classi tessiturali degli orizzonti superficiali (topsoil). Tali cartografie tematiche sono degli elaborati complessi che rappresentano la distribuzione geografica dei principali tipi di suolo presenti nella pianura e nella pedecollina lombarda, e ne descrivono i principali caratteri chimico-fisici. Esse forniscono informazioni utili a valutare l'idoneità di un territorio ad essere utilizzato per molteplici attività (agricoltura, selvicoltura, urbanistica, industria, viabilità, impianti vari, ricreazione ecc.), costituendo un importante ausilio nella gestione e pianificazione territoriale.

In pedologia, prende il nome di *tessitura (textural class)* la distribuzione percentuale (in peso) della terra fine nelle frazioni granulometriche che la compongono, dove le particelle minerali hanno un diametro equivalente ≤ 2 mm (ovvero sabbia, limo ed argilla; Soil Survey Staff, 1993; FAO, 2006).

I frammenti grossolani (cioè lo *scheletro*, con diametro > 2mm) sono invece costituiti da ghiaie, ciottoli e pietre di diversa natura mineralogica, forma e dimensione; essi riducono il volume di suolo “attivo” sotto il profilo biochimico e chimico-fisico e la capacità di ritenzione idrica (FAO, 2006; Soil Survey Staff, 2006; Costantini, 2007).

Dalla composizione in percentuale di sabbia, limo ed argilla è possibile attribuire il terreno ad una *classe di tessitura* utilizzando il diagramma triangolare dell’USDA (United States Department of Agriculture) che mette in relazione il contenuto in sabbia, limo ed argilla con le classi di tessitura, considerando il limite tra limo e sabbia pari a 50 micron (Soil Survey Staff, 1993; Finke et al., 2001). L’analisi granulometrica ci fornisce una prima idea generale delle proprietà fisiche di un suolo; essa è anche uno strumento per assegnare ad ogni suolo il nome della sua “*classe tessiturale*”, ad esempio franco, franco – sabbioso, argilloso (Figura 27).

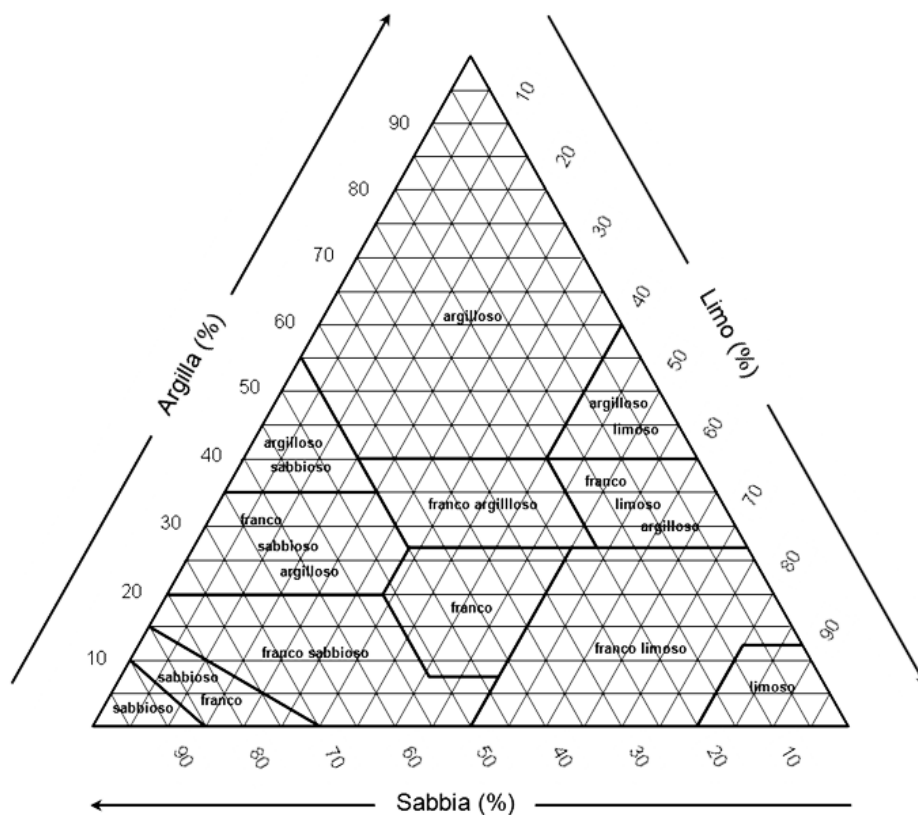


Figura 27. Triangolo USDA per la determinazione della classe tessiturale (da: Soil Survey Staff, 1993).

Le classi tessiturali fondamentali possono essere raggruppate in gruppi generali, poiché spesso è più conveniente una descrizione in termini più generici e meno specifici. Generalmente, le classi tessiturali sono distinte in tre grandi gruppi di classi di tessitura (ARPA Lombardia, 2002; Brady & Weil, 2002; Figura 28):

1. *Gruppo delle classi sabbiose*: in questo gruppo ci sono i suoli in cui la frazione sabbiosa è superiore al 70% del totale, e l'argilla inferiore al 15%. Comprende due specifiche classi: sabbioso franco e sabbioso.
2. *Gruppo delle classi argillose*: per essere definito argilloso un suolo deve contenere più del 40% di argilla; le classi comprese sono: argilloso, limoso argilloso e sabbioso argilloso; le ultime due classi possono contenere rispettivamente più limo o sabbia che argilla, ma quest'ultima condiziona tuttavia in modo determinante le proprietà tessiturali.
3. *Gruppo delle classi franche*: è il gruppo che contiene il maggior numero di suddivisioni. Idealmente un suolo franco è dato dalla mescolanza, equilibrata, di sabbia, limo e argilla; conseguentemente, anche le proprietà che condizionano l'uso del suolo, ad esempio la pesantezza o la leggerezza, sono presenti in proporzioni equilibrate. Tuttavia, sovente, una debole prevalenza di una delle tre frazioni richiede l'uso di aggettivi che meglio completano e definiscono la classificazione tessiturale. Così, un suolo franco dove domina la sabbia viene chiamato franco sabbioso; allo stesso modo possiamo avere un suolo franco limoso, franco limoso argilloso, franco sabbioso argilloso, franco argilloso. Anche la classe limosa, dominata dal limo, viene convenzionalmente inserita fra il gruppo delle classi franche.

La regione Lombardia dispone di un set di carte pedologiche multi-scala, realizzate e periodicamente aggiornate da ERSAF, che rappresentano in parte o in toto il territorio lombardo. Queste carte, ciascuna secondo il dettaglio permesso dalla propria scala, rappresentano l'estensione e la distribuzione dei principali tipi di suolo rilevati, campionati e analizzati in Lombardia.

Tipologia suoli	Termini generali	Classi tessiturali	Sigla
Suoli argillosi	Fine	Argillosa	A
		Argilloso limosa	AL
		Argilloso sabbiosa	AS
Suoli franchi	Moderatamente fine	Franco limoso argillosa	FLA
		Franco sabbioso argillosa	FSA
		Franco argillosa	FA
	Media	Limosa	L
		Franco Limosa	FL
		Franca	F
		Franco sabbiosa molto fine	FSmf
	Moderatamente grossolana	Franco sabbiosa fine	FSf
		Franco sabbiosa grossolana	FSg
Franco sabbiosa		FS	
Suoli sabbiosi	Grossolana	Sabbiosa franca	SF
		Sabbiosa	S

Figura 28. Classi tessiturali fondamentali e relativi raggruppamenti (modificato: Soil Survey Division Staff, 1993; Brady & Weil, 2002).

Il dettaglio informativo della carta pedologica è correlato alla scala del rilevamento pedologico e della restituzione cartografica, da cui discendono la conoscenza delle proprietà e qualità dei suoli, l'accuratezza dei limiti tra suoli diversi e la possibilità di rappresentare i suoli separatamente, fornendo un'informazione più precisa, o in associazioni. Le cartografie di riferimento per questa tesi sono state scaricate dal Geoportale della Regione Lombardia e riguardano i dati aggiornati all'anno 2011 (download dal sito web <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>):

- Carta Pedologica di semi-dettaglio in scala 1:50.000 della sola pianura e pedecollina lombarda, che permette la rappresentazione cartografica dei suoli della pianura e pedecollina lombarda a livello di province o di gruppi di comuni. È una carta dalla quale possono essere estratte informazioni su: capacità d'uso dei suoli, attitudine spandimento reflui, attitudine spandimento fanghi, capacità protettiva acque sotterranee, capacità protettiva acque superficiali e valore naturalistico (Regione Lombardia, 2013).

- Carta Pedologica di riconoscimento in scala 1:250.000 della regione Lombardia, la quale consente l'inquadramento generale delle caratteristiche pedologiche del territorio regionale, permettendo una visione d'insieme anche a livello provinciale, delle problematiche connesse con l'utilizzazione della risorsa suolo. Contiene informazioni del tipo: profondità utile dei suoli, contenuto di CO (Carbonio Organico) medio nel 1° metro, pH medio del 1° metro, tessitura del 1° metro e granulometria del 1° metro (Regione Lombardia, 2013).

Le due carte pedologiche rappresentano la distribuzione spaziale dei suoli nel territorio da esse coperto, descrivendo in un caso le principali attitudini applicative (carta 1:50.000) e nell'altro alcuni caratteri funzionali (carta 1:250.000).

Nella seguente Figura 29 si riporta il confronto delle tessiture riscontrate dalle suddette carte pedologiche: è evidente la differenza nel numero di classi tessiturali individuate, che aumentano con il dettaglio della scala.

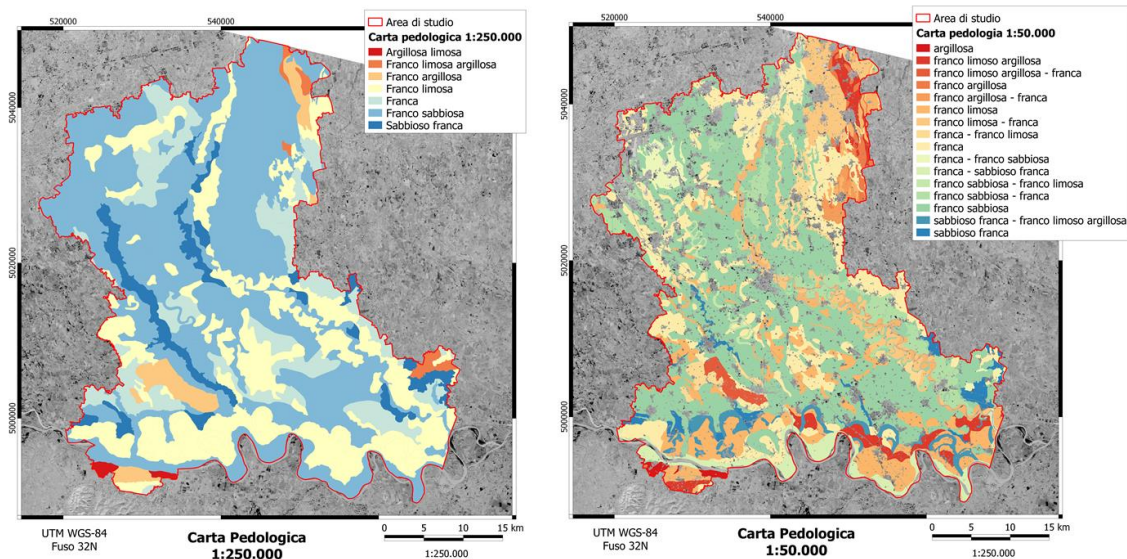


Figura 29. Layout delle due tipologie di carte pedologiche utilizzate: alla scala di riconoscimento (1:250.000; a sinistra), vengono distinte 7 classi tessiturali, mentre, aumentando il dettaglio (1:50.000; a destra), si distinguono ben 16 classi tessiturali.

3.5. DATI METEO-CLIMATICI

ARPA Lombardia è l'ente pubblico attualmente preposto al monitoraggio e al controllo delle principali matrici ambientali (acqua, aria e suolo), alla vigilanza del territorio e delle attività antropiche. L'agenzia gestisce diversi sistemi per la valutazione dello stato ambientale, con reti di monitoraggio atte al controllo delle matrici ambientali. Nell'ambito di questa tesi si è reso importante consultare i dati di temperatura e precipitazione della rete termo-pluviometrica in prossimità delle acquisizioni satellitari. Il monitoraggio pluviometrico è attivo da oltre un secolo e perciò supportato da un gran numero di stazioni di rilevamento. Attualmente, la rete meteorologica di ARPA Lombardia conta 66 stazioni meteo-climatiche, di cui 37 con solo pluviometro, 4 con solo termometro e 25 stazioni con entrambe le modalità di rilevamento (fonte: ARPA Lombardia – Servizio Meteorologico regionale; <http://ita.arpalombardia.it>). Come si può notare in Figura 30, la distribuzione dei pluviometri garantisce una buona copertura del territorio regionale.

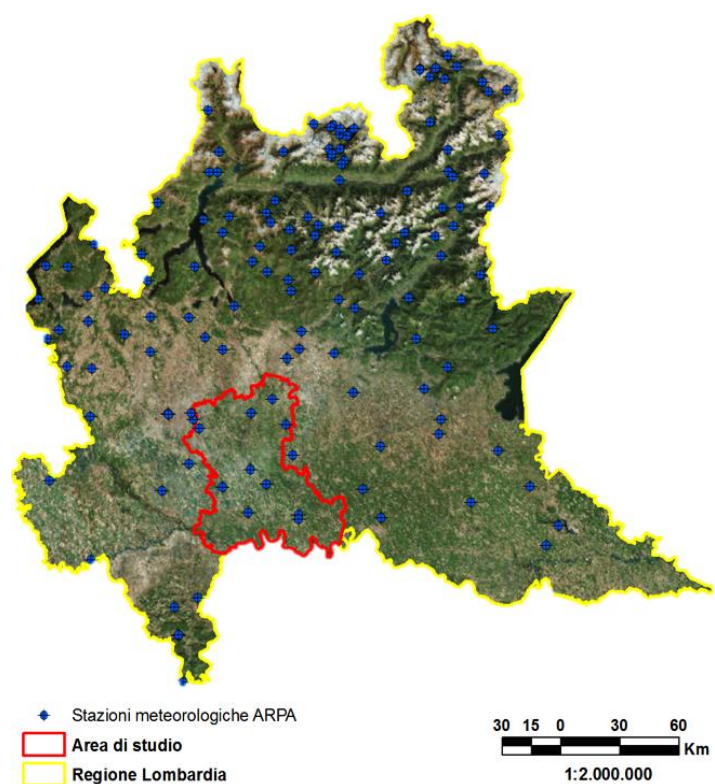


Figura 30. Rete meteorologica di ARPA Lombardia: stazioni termo-pluvio-nivometriche all'intero territorio regionale (fonte: <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>).

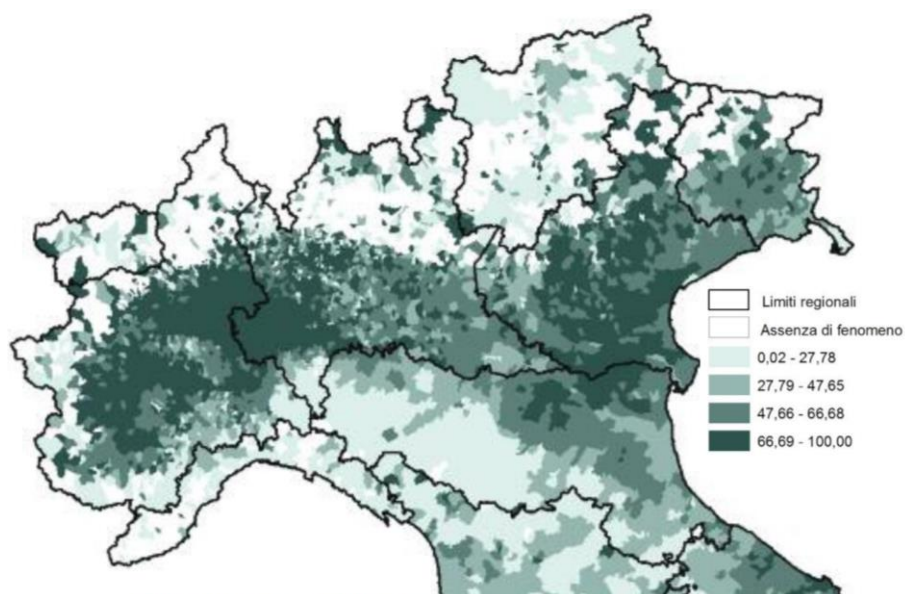
La rete, oltre a fornire in tempo reale i dati di precipitazione per la valutazione delle situazioni di emergenza, funge da supporto informativo a studi idrologici e climatologici per la pianificazione del territorio e la gestione della risorsa idrica.

3.6. CENSIMENTO AGRICOLTURA (DATI ISTAT)

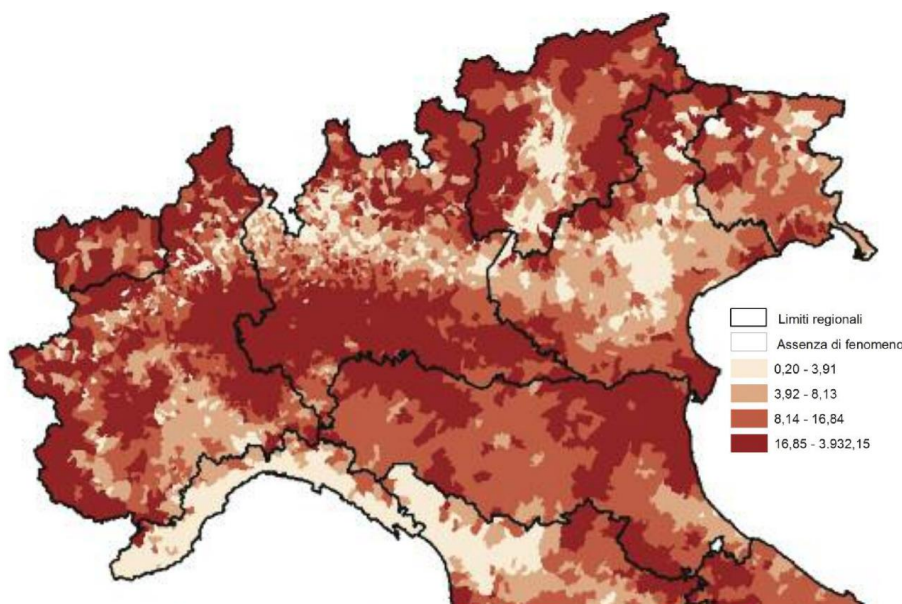
Il 6° Censimento Generale dell'Agricoltura ha rilevato le caratteristiche strutturali e socio-economiche delle aziende agricole e le informazioni relative ai metodi di produzione agricola da esse adottate (ISTAT, 2013). Nello specifico, ha rilevato il numero delle aziende agricole, la loro dimensione complessiva in termini di superficie (espressa in SAU – Superficie Agricola Utilizzata), le principali forme di utilizzazione dei terreni (seminativi, coltivazioni legnose agrarie, prati permanenti e pascoli, boschi ecc.), oltre ad altri parametri di fondamentale importanza per meglio conoscere il settore.

Il sistema agricolo Lombardo è tra i più rilevanti a livello italiano (ISTAT, 2013): la Lombardia è una delle Regioni con il tasso di SAU più elevata, con 18.38 ha di SAU media. Sempre in Lombardia, la Provincia di Lodi presenta il valore massimo con 42.09 ha di SAU media, confermando che l'area di studio si colloca in una zona agricola intensiva. La Regione Lombardia mostra una maggiore vocazione alle coltivazioni a seminativi: notevole è la produzione di cereali, che rappresenta il 20.2% del totale nazionale; seguono i prati permanenti e le legnose agrarie (ISTAT, 2013). Le colture più diffuse sono principalmente il mais e in secondo luogo il grano, essendo queste le colture chiave dei sistemi agricoli intensivi (Grignani et al., 2007). In Lombardia, circa il 45% dei seminativi sono coltivati a mais. In Figura 31 sono illustrate le distribuzioni delle superfici coltivate a cereali per comune, espressa in % su superficie a seminativi, e la superficie agricola utilizzata (SAU) media aziendale per comune, in ha per azienda.

In questa tesi sono stati utilizzati i dati del 6° censimento dell'agricoltura di ISTAT (disponibili su: <http://agri.istat.it/>) per definire un quadro conoscitivo generale dell'area di studio circa le tipologie di coltivazioni presenti in determinati periodi, prossimi alle acquisizioni da remoto.



Superficie a cereali per comune (percentuale su superficie a seminativi)



Superficie agricola utilizzata media aziendale per comune (ettari per azienda)

Figura 31. Censimento agricoltura: in alto, la superficie a cereali per comune (% su superficie a seminativi); in basso, la superficie agricola utilizzata media aziendale per comune (ha per azienda; da: ISTAT, 2013).

Capitolo 4

METODO DI ELABORAZIONE DEL DATO OTTICO

I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando diverse tecniche, ognuna delle quali con un preciso obiettivo, con la finalità ultima di ottenere una mappa delle tessiture dei suoli nudi, che potrebbe essere utilizzata come INPUT in una futura fase di valutazione del grado di vulnerabilità dell'acquifero freatico.

L'utilizzo dei dati ottici multispettrali è servito per definire l'abbondanza dei suoli nudi, basandosi sull'applicazione della tecnica LSMA (Linear Spectral Mixture Analysis), classificarli e associare ad essi la tessitura fornita dai dati regionali sulla pedologia, tramite un'apposita analisi statistica. Si è cercato di stimare le proprietà dei suoli dai dati Landsat mediante la realizzazione di prodotti dal valore aggiunto che permettono di osservare la variabilità nello spazio e nel tempo dei parametri che descrivono i suoli, facendo attenzione all'ambiguità dei segnali spettrali.

Inoltre, la raccolta delle firme spettrali di campo è stata utilizzata per la validazione dei dati di riflettanza delle risposte spettrali, dando un'interpretazione e un nome alle firme spettrali dei dati da remoto.

In Figura 32 è riportato lo schema metodologico della procedura in tutti i suoi passaggi: partendo da una serie di dati ancillari (censimento agricoltura, informazioni meteorologiche, carte pedologiche e di copertura e uso del suolo) e spettrali (immagini satellitari e radiometria di campo) è stato possibile realizzare dapprima le mappe delle coperture e successivamente le mappe classificate dei suoli nudi.

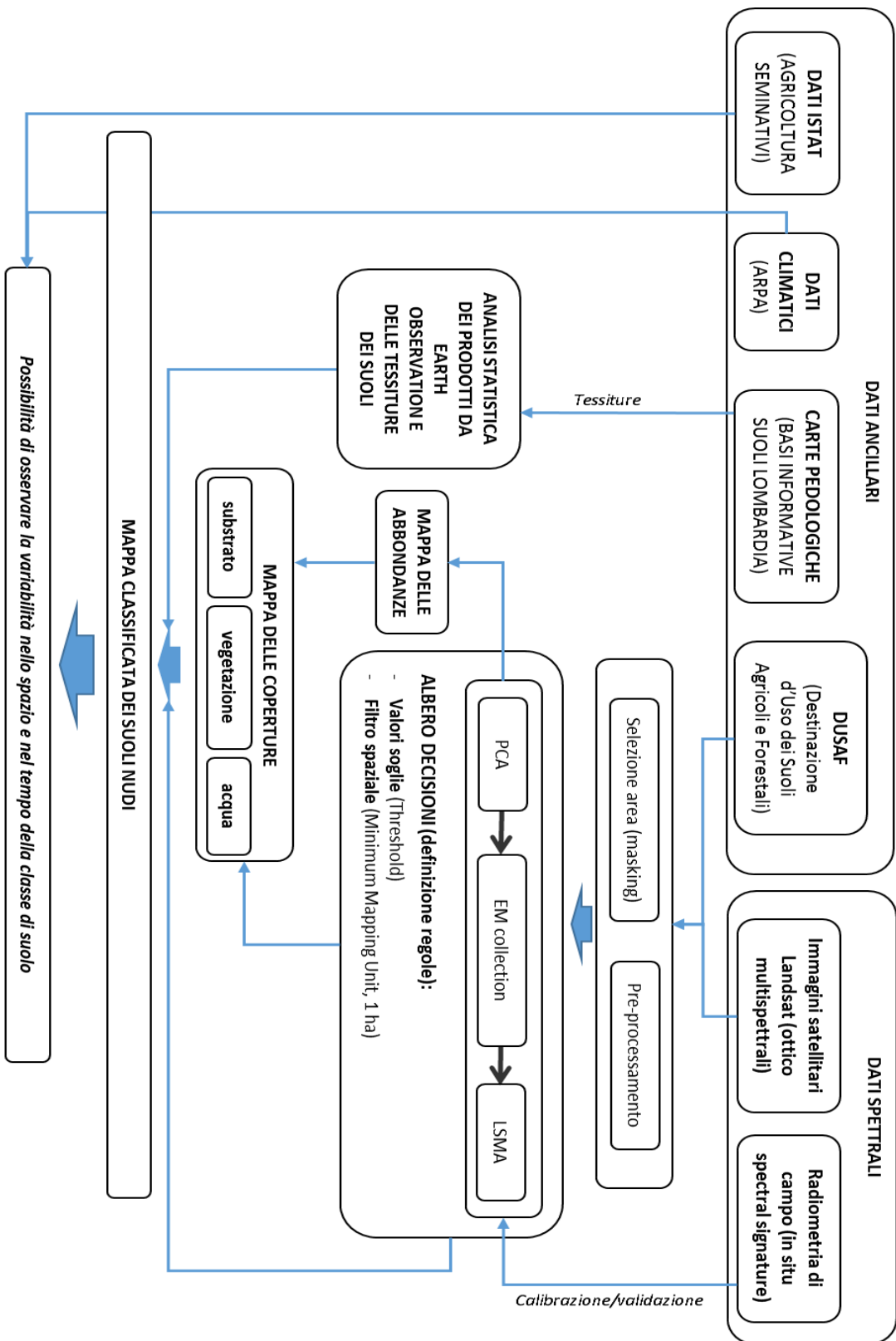


Figura 32. Diagramma di flusso che descrive sinteticamente i passaggi seguiti per ottenere una mappa classificata dei suoli nudi.

4.1. PRE-PROCESSAMENTO DEI DATI TELERILEVATI

Le immagini satellitari, al momento del rilevamento, contengono delle distorsioni geometriche e radiometriche dovute al sistema di acquisizione (piattaforma e sensore), al mezzo di propagazione del segnale (atmosfera), all'angolo di ripresa e all'effetto della curvatura terrestre.

Con il termine di *pre-elaborazione* (o *pre-processing*) si indicano una serie di procedure e metodologie correttive sui valori numerici dei pixel e sulla loro collocazione spaziale (problematiche inevitabilmente presenti nei dati RM). Lo scopo è quello di produrre un'immagine che sia il più vicina possibile, in senso radiometrico e geometrico, alle caratteristiche di radianza/riflettanza della scena originale (Gomasca, 1998). Tali elaborazioni, preliminari all'utilizzo effettivo dei dati, costituiscono una condizione necessaria per permettere all'utente l'utilizzo delle informazioni al massimo della loro potenzialità e del loro contenuto.

Tutte le immagini Landsat sono state richieste con livello di processamento L1T (Level 1 standard Terrain correction), che corrisponde ad un prodotto corretto radiometricamente per le distorsioni legate al sensore e corretto geometricamente per gli *errori sistematici* (curvatura e rotazione terrestre ed effetti panoramici) e casuali presenti nell'immagine. Tali correzioni sono state apportate direttamente dal fornitore delle scene (USGS, 2007; USGS, 2015). Le immagini L1T sono sottoposte a correzione incorporando punti di controllo a terra (Ground Control Point – GCP) e utilizzando un modello digitale di elevazione (DEM) per raggiungere un'elevata accuratezza geodetica. Inoltre, le immagini sono georiferite nella proiezione cartografica UTM 32N – WGS 84.

4.1.1. Calibrazione radiometrica del sensore

Per poter procedere al processamento delle immagini è stata necessaria una calibrazione radiometrica, in cui i valori dei pixel sono stati convertiti da una grandezza adimensionale (Digital Number – DN), in una grandezza fisica che rappresenti la risposta dell'oggetto telerilevato, come la riflettanza esootmosferica

(Top Of Atmosphere – TOA), in accordo con Chander & Markham (2003); Chander et al. (2009) e USGS (2015).

La calibrazione radiometrica TOA prevede il calcolo del valore di riflettanza al top dell'atmosfera, normalizzando le diverse condizioni di illuminazione solare a diversi tempi di acquisizione. L'informazione spettrale rilevata, infatti, non corrisponde esattamente a quella del target al suolo, perché risente dell'influenza dei pixel circostanti e dell'effetto atmosferico, che comportano un conseguente aumento del valore della grandezza fisica registrata al sensore.

Questa fase di pre-processamento ha previsto l'utilizzo del plugin “*Semi-Automatic Classification*” in QGIS (QuantumGis, Gnu General Public License) che effettua la calibrazione mediante l'inserimento di alcuni parametri. Una volta effettuata la calibrazione in riflettanza, è possibile procedere con l'elaborazione delle immagini contenenti le informazioni in riflettanza.

4.2. CREAZIONE DI UNA MASCHERA (MASKING)

Frequentemente, nel telerilevamento applicato agli ambienti naturali sorge la necessità di escludere dalle elaborazioni i pixel che rientrano in aree antropizzate, in aree sommerse o più in generale non attinenti ai parametri oggetto di studio. Questi pixel vengono esclusi dall'immagine raster e dalle successive operazioni di analisi per poter determinare con certezza che la variabilità osservata non derivi da superfici non oggetto di studio. Per ottenere risultati significativi è stata quindi costruita una maschera (processo noto come *masking*) con lo scopo di restringere l'analisi alle sole coperture naturali, escludendo, quindi, tutto l'antropico presente nell'area di studio.

Per fare ciò, si è creato un GeoTIFF sulla base dei confini dell'area di studio (*Region Of Interest – ROI*) e delle coperture antropiche presenti (da DUSAF). Mediante la sovrapposizione della ROI con il dato DUSAF è stato possibile creare la maschera, sull'extent dei dati Landsat, che è stata utilizzata per tutte le successive fasi di processamento dei dati. Questa è stata creata con il software ENVI 4.8 (ENVIRONMENT for Visualizing Images) attraverso la funzione “*Build mask*” presente nel menu a tendina “*Basic tools*”. In questo modo, è stata creata

un'immagine con le stesse dimensioni di quella originale ma in formato binario: ai pixel da includere nell'analisi è stato attribuito il valore 1, mentre gli altri (classi antropiche del DUSAF e le aree al di fuori la ROI) hanno assunto valore 0. Inoltre, la maschera è stata modificata e adattata per far ricadere l'area di studio all'interno del frame dell'immagine L8 (Figura 33).

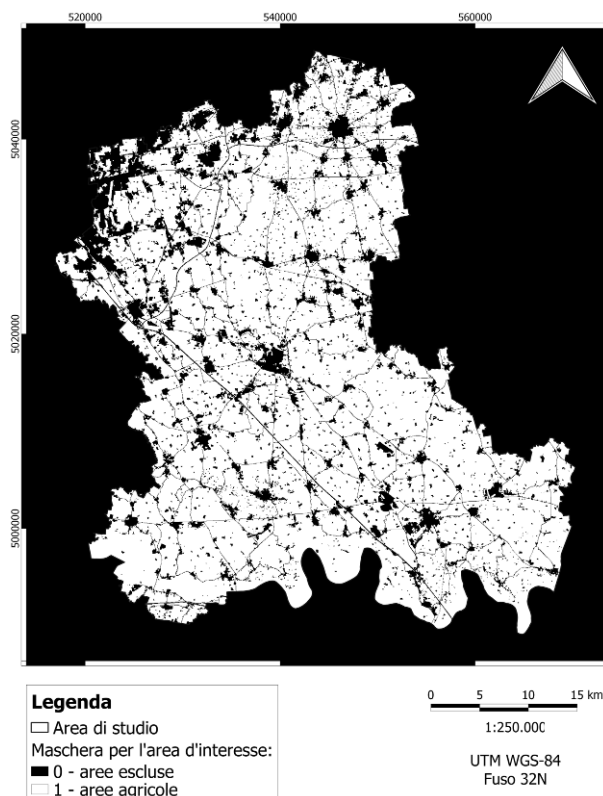


Figura 33. Maschera utilizzata per delimitare l'area di studio da includere nelle fasi di elaborazione finale della classificazione dei suoli da dati Landsat: i pixel in bianco sono compresi entro i confini dell'area considerata agricola (territorio in assenza di copertura antropica), mentre i pixel neri non sono invece stati considerati nella fase di processamento (valore nullo).

4.2.1. Mappatura delle coperture antropiche

La mappatura dei suoli nudi a partire da dati satellitari ottici multispettrali si basa sull'analisi delle risposte radiometriche dei diversi target a terra. La firma spettrale delle coperture antropiche è molto simile a quella dei suoli nudi (Mering & Chopin, 2002; Van de Voorde et al., 2008; Congedo & Munafò, 2012), perciò occorre escludere tali superfici dai dataset telerilevati per ridurre il campione numerico su cui effettuare le analisi, ottenendo aree corrispondenti esclusivamente

da elementi naturali. La mappatura delle aree caratterizzate da copertura di tipo antropico (tessuto urbano e aree industriali) è stata effettuata mediante il ricorso di dati ancillari, ossia all'uso della carta tematica del DUSAF (versione 4.0). Nell'area di studio è stata eliminata quella copertura identificata come “*aree antropizzate*”, ovvero tutte le superfici urbane, le infrastrutture, le discariche e gli ambiti degradati soggetti ad usi diversi, nonché le aree non foto-interpretabili perché coperte da segreto militare. In dettaglio, sono state considerate le seguenti sottoclassi delle aree antropizzate (e relativi codici; Regione Lombardia & ERSAF, 2010b):

- Tessuto urbano continuo (U_1111, U_1112).
- Tessuto urbano discontinuo (U_1121, U_1122, U_1123, U_11231).
- Zone produttive, di grandi impianti di servizi pubblici e privati pubblici e privati (P_12111, P_12112, P_12121, P_12122, P_12123, P_12124).
- Reti stradali, ferroviarie e spazi accessori (P_1221, P_1222).
- Aree portuali, aeroporti ed eliporti (P_123, P_124).
- Cantieri (R_133).
- Aree verdi urbane (AV_1411, AV_1412).
- Aree sportive e ricreative (AV_1421, AV_1422, AV_1423, AV_1424).
- Aree estrattive e discariche (R2, R3).

Oltre alle classi del DUSAF, è stato eliminato il reticolo stradale principale aggiornato al 2015, digitalizzato dall'Ufficio Territorio e Urbanistica, Unità Organizzativa Attività Generali e di Conoscenza del Territorio della Regione Lombardia, scaricabili direttamente dalla pagina web dell'ufficio addetto (<https://www.dati.lombardia.it/Territorio/Rete-Stradale/nyxe-8s3y>).

4.3. CLASSIFICAZIONE DELLE IMMAGINI

A valle della calibrazione radiometrica delle immagini, per il processing dei dati multispettrali, l'approccio metodologico utilizzato è la LSMA (Linear Spectral Mixture Analysis), tecnica a risoluzione sub-pixel (basata esclusivamente sulle informazioni spettrali dei singoli pixel presenti nell'immagine) che permette di

ottenere una riclassificazione dell'immagine in cui si visualizzano, in modo continuo, le abbondanze (o fractions) delle componenti fondamentali dei pixel presenti sulla scena, noti come endmembers (EM; Smith et al., 1985 e 1990; Boardman, 1993; Adams et al., 1995; Taramelli et al., 2013 e 2014). Le abbondanze rappresentano le misurazioni, in ciascun pixel, della composizione percentuale di ogni endmember nel modello spectral mixing (Settle & Drake, 1993; Cochrane, 1998). Ogni elemento presente nelle immagini acquisite da remoto, fornisce una risposta spettrale (riflettanza) diversa a seconda della lunghezza d'onda (λ) con cui è indagato, che è funzione della natura fisica dell'elemento stesso: l'elemento fisico riflettente (EM) fornisce una differente risposta spettrale nelle diverse bande con cui viene rilevato, e l'insieme di tali risposte costituisce la firma spettrale dell'endmember (Smith et al., 1990; Adams et al., 1995; Roberts et al., 1998; Elmore et al., 2000; Small, 2004). Generalmente, le immagini sono costituite da pixel risultanti da segnali complessi provenienti da più EM: i pixel contenenti più di un materiale sono considerati pixel misti (*mixed pixel*), mentre quelli rappresentativi di una singola componente fisica sono detti pixel puri (*pure pixel*; Johnson et al., 1983). La firma spettrale di un pixel puro è rappresentativa di una componente fisica fondamentale (es. acqua, vegetazione, suolo), pertanto non è un segnale misto dovuto al contributo di più componenti (Johnson et al., 1983; Smith et al., 1985; Adams et al., 1986; Taramelli & Melelli, 2009; Figura 34).

Partendo da tali premesse, un pixel fornisce un segnale di riflettanza estremamente complesso, spesso dovuto alla combinazione lineare delle risposte degli EM presenti. La LSMA assimila tale segnale ad uno spazio multidimensionale con tante dimensioni quanti sono gli elementi riflettenti che lo costituiscono. È una metodologia che permette la valutazione di risposte miste provenienti dai pixel dell'immagini ed è molto utilizzata nell'ambito della mappatura di ambienti naturali attraverso il telerilevamento (Adams et al., 1986 e 1993; Smith et al., 1990; Elmore et al., 2000; Small, 2004). Essa presuppone che la variabilità spettrale in un'immagine possa essere modellizzata da un ristretto numero di variabili ciascuna con una distinta firma spettrale, considerando

singolarmente ciascun pixel, e all'interno di essi stimare la presenza e la proporzione degli EM selezionati.

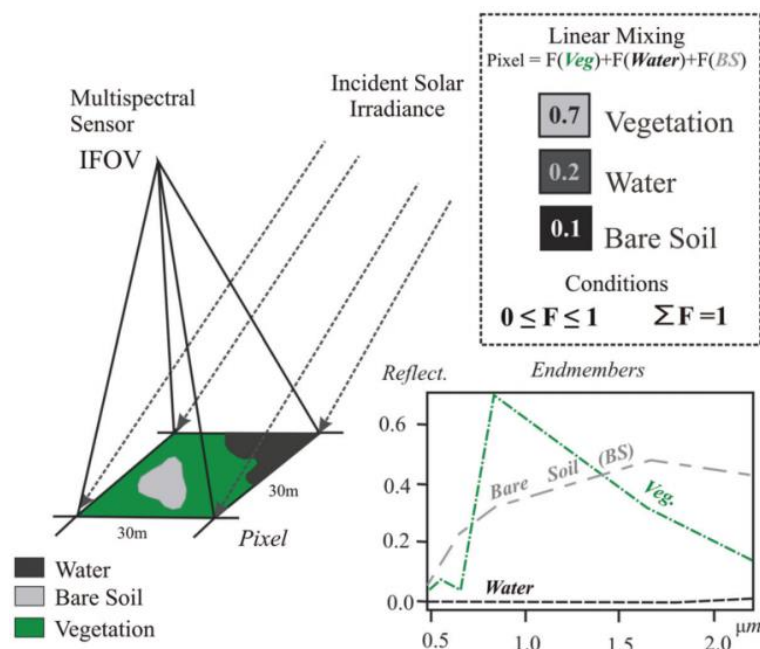


Figura 34. Scomposizione di un pixel con la LSMA, con risoluzione a 30 m, costituito dalla mistura di 3 componenti spettrali: vegetazione, acqua e suolo (da: Machado & Small, 2013).

Questa tecnica nasce per superare il problema dell'assegnazione di ciascun pixel ad una classe univoca, come avviene nelle classificazioni rigide (supervisionate e non supervisionate), poiché è raro che i pixel siano costituiti da una singola componente spettrale. Pertanto, la potenzialità della LSMA risiede nella capacità di calcolare la frazione di ogni elemento spettralmente puro (EM) che sarà una stima dell'abbondanza di tale componente fisica rispetto alla superficie acquisita. La procedura di selezione degli EM prevede inizialmente una riduzione della dimensionalità del dato attraverso la *Principal Component Analysis (PCA, o Analisi delle Componenti Principali)*, tecnica per permette di incrementare l'accuratezza dell'unmixing, aumentando il grado di separabilità degli endmembers (ovvero la differenza tra di essi). Perciò, poiché il pixel è una superficie eterogenea dal punto di vista spettrale, la LSMA permette di determinare le abbondanze all'interno di ogni singolo pixel, sulla base degli EM puri individuati attraverso la PCA (Manzo et al., 2015).

4.3.1. Linear Spectral Mixture Model (LSMM)

La LSMA si basa sul modello lineare di mistura (Linear Spectral Mixture Model – LSMM; ISPRA, 2010). Il modello viene applicato per linearizzare un segnale complesso e per tenere conto della variabilità interna a ciascun pixel. L'assunzione di base dell'algoritmo è che la risposta spettrale di questi ultimi è una funzione lineare della frazione di abbondanza relativa delle componenti spettrali pure (EM; Silván-Cárdenas & Wang, 2010).

La radianza della superficie di un generico pixel misto “R” sarà quindi un risultato pesato spazialmente del contributo spettrale di ciascun EM, in relazione alla seguente equazione di primo grado, utile a risolvere il segnale complesso proveniente da una immagine (Boardman, 1989; Small, 2004; ISPRA, 2010):

$$R(\lambda) = f_1E_1(\lambda) + f_2E_2(\lambda) + f_3E_3(\lambda)$$

dove, $R(\lambda)$ rappresenta i valori di radianza o riflettanza (segnale complesso) misurati dal sensore nelle lunghezze d'onda delle sue bande spettrali; $E_x(\lambda)$ rappresenta la risposta spettrale dell'elemento puro “x” per le differenti lunghezze d'onda λ ; infine, f_x rappresentano le abbondanze degli elementi puri, espresse come frazioni di superficie del pixel coperte della classe “x”.

Quindi, dato valore di misura spettrale associato ad un pixel e definiti gli *endmembers*, il problema che si pone è quello inverso, detto *unmixing*, cioè di trovare le frazioni delle classi presenti in ciascun pixel misto (ISPRA, 2010). Pertanto, l'algoritmo di unmixing rappresenta un modello lineare, nel quale si assume che la riflettanza di un pixel sia una combinazione lineare del contributo spettrale di ciascun EM in proporzione alla superficie che ciascuno di essi occupa nel pixel (Adams et al., 1993; Milton, 1999).

Le abbondanze possono essere calcolate secondo diversi modelli (Linear Spectral Unmixing – LSU; Silván-Cárdenas & Wang, 2010):

- *Unconstrained*: i valori frazionari non presentano costrizioni e possono quindi assumere qualsiasi valore numerico, anche abbondanze negative.

- *Constrained*: la somma delle abbondanze viene posta uguale a 1, quindi viene imposta una costrizione ai valori possibili di frazione.
- *Fully constrained*: la somma delle abbondanze è 1, perciò i valori di abbondanza non possono essere negativi. I valori frazionari possono essere compresi soltanto tra 0 e 1.

In ambito della suddetta tesi è stato utilizzato il modello *Fully Constrained LSU*. Partendo dalla radiazione emessa da una porzione del territorio, la LSMA consente di interpretare una risposta complessa mediante la scomposizione in singoli elementi. Il prodotto è una mappa delle abbondanze degli EM considerati che vengono successivamente interpretati e ricondotti a determinate matrici ambientali attraverso l'utilizzo di un *albero delle decisioni (Decision Tree)*, permettendo così di determinare la variabilità nella dimensione spaziale delle componenti fisiche, ovvero delle coperture individuate nella fase di selezione degli EM.

4.3.2. Principal Component Analysis (PCA)

I metodi di analisi dei dati sono fondamentali nell'ambito delle immagini telerilevate, dove la quantità di informazione è elevata a causa dell'alta dimensionalità dei dati, in cui ogni banda spettrale può essere considerata una dimensione. Uno dei metodi di riduzione della dimensionalità più utilizzati, allo scopo di trasformare un dato multidimensionale in una rappresentazione a dimensionalità minore, è l'Analisi delle Componenti Principali (Principal Component Analysis – PCA; Jolliffe, 2002).

La PCA è una tecnica statistica volta a ridurre la quantità di variabili di interesse attraverso l'uso di variabili ausiliarie collegate alle prime ed indipendenti fra loro. Tale tecnica, introdotta da Pearson (1901), venne poi sviluppata nella forma attuale da Hotelling (1933). Consiste in una procedura di selezione degli EM che prevede una riduzione della dimensionalità dei dati, mediante la quale viene valutata la variabilità del segnale degli elementi inclusi nella scena, permettendo di selezionare nello spazio multidimensionale (*mixing space*) gli elementi fisici

riflettenti puri (EM), come ad es. acqua, suolo e vegetazione. Una volta definita la riflettanza di elementi puri è possibile risolvere il segnale derivante dai pixel misti, sviluppando modelli di equazioni lineari che, risolti, forniscono la percentuale di EM presenti in ogni pixel (Taramelli & Melelli, 2009). Vengono così individuati quali siano quelli che forniscono la maggior parte delle informazioni alla scena (Boardman, 1989; Boardman and Kruse, 1994). Perciò, la PCA è una tecnica che permette di ridurre la dimensionalità del dato, aumentando la separabilità tra gli EM, marcandone la differente risposta spettrale.

4.3.3. Selezione degli endmembers

Per poter risolvere il sistema di equazioni lineari della SMA, vanno identificate le risposte in riflettanza degli EM presenti nell'immagine, procedimento definito come *selezione degli endmembers*: è strettamente legato alla PCA, la quale permette di osservare le coperture più rappresentative dello spettro e la varianza delle componenti principali (variabilità del segnale degli elementi inclusi nella scena). Il “*PC Eigenvalues plot*” è la rappresentazione della varianza correlata spazialmente delle singole bande e descrive il contributo di ogni *Principal Components (PCs)*, ossia l'autovalore associato ad ognuna di esse, oltre alla variabilità dei valori (Figura 35). Sostanzialmente, le prime 3 bande racchiudono oltre il 90% della variabilità della scena (Small & Milesi, 2013): la PC 1 contiene gran parte della varianza, che diventa inferiore nelle PC 2-3, mentre per le successive PC la varianza è trascurabile.

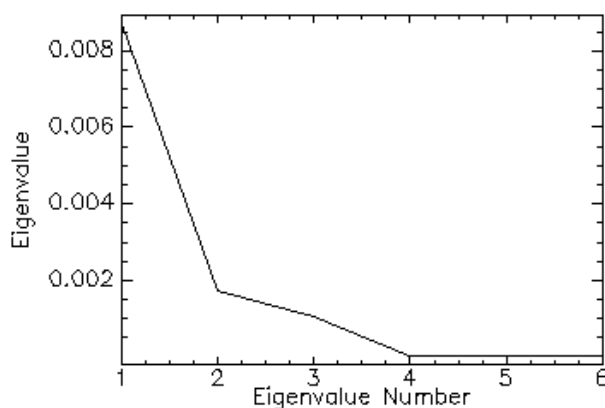


Figura 35. *PC Eigenvalues plot*: le prime tre PC contengono gran parte della varianza.

Proiettando i pixel in uno spazio cartesiano bidimensionale in cui si possono rappresentare varie combinazioni delle prime PCs, ordinati secondo il grado di varianza delle caratteristiche spettrali, si ottengono i “2D scatterplot”, rappresentazioni grafiche che forniscono importanti informazioni sulle caratteristiche spettrali dei pixel dell’immagine e sulla distribuzione spaziale delle PCs, permettendo l’identificazione degli EM all’interno dello spectral mixing space da esse delimitato (Boardman, 1993). I pixel si dispongono all’interno del mixing space sulla base del contenuto di varianza che apportano alla scena: gli spettri degli pixel puri (EM) sono localizzati agli apici del mixing space, mentre i pixel misti si ritrovano al suo interno (Figura 36).

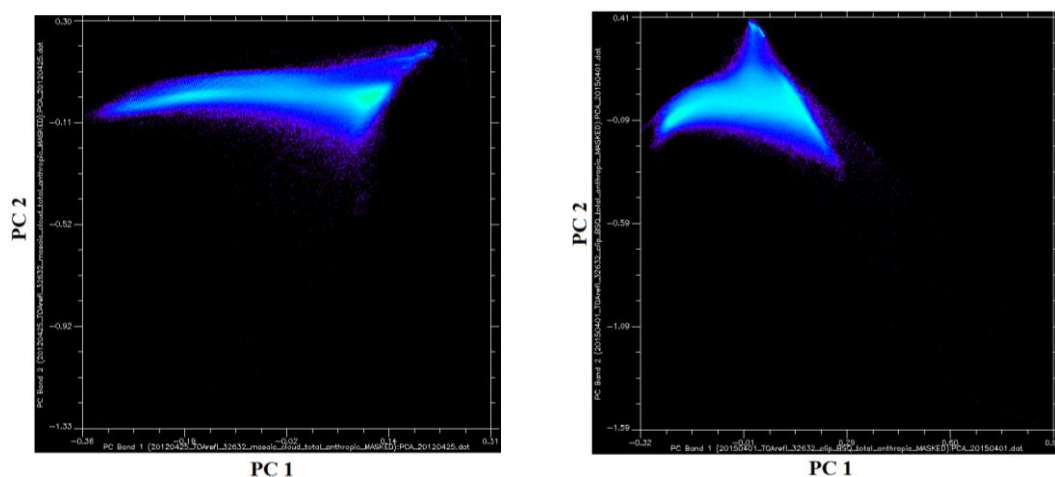


Figura 36. Density-shaded 2D scatterplot: visualizzazione delle Principal Components (PC 1 e PC 2) delle immagini 25/04/12 (L7, a sinistra) e 01/04/2015 (L8, a destra), con lo scopo di selezionare gli endmembers.

Interrogando i valori di riflettanza di ciascun pixel rappresentato nel 2D scatterplot, è possibile visualizzare i profili spettrali degli EM individuati. Generalmente, la topologia del mixing space delle Landsat assume una forma triangolare, molto simile a quella riconosciuta in altre aree del mondo, ampiamente dimostrato nei lavori di Small (2001 e 2005), Small & Lu (2006) e Small & Milesi (2013): i tre vertici corrispondono agli *endmembers primari*, ovvero *Substrato*, *Vegetazione* e *Dark* (acqua, superfici molto assorbenti e/o zone d’ombra; Figura 37).

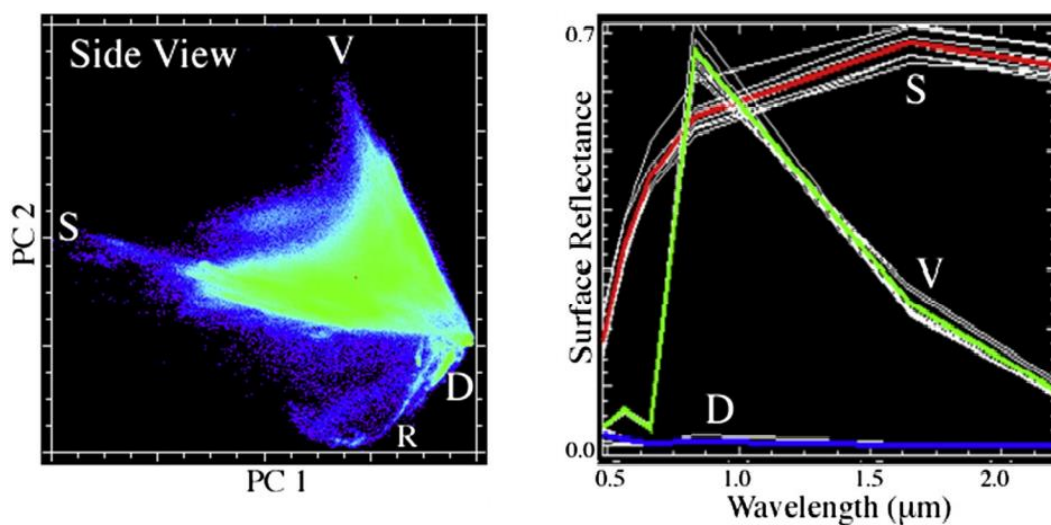


Figura 37. Landsat mixing space e spettri degli EM primari: Substrate (S), Vegetation (V) e Dark (D) formano un piano triangolare in cui vengono proiettati tutti i pixel presenti nella scena (da: Small & Milesi, 2013).

Nella selezione degli endmembers, l'approccio utilizzato in questo lavoro è stato duplice:

1. Approccio iniziale di tipo image-based ha previsto l'individuazione degli EM all'interno del mixing space, utilizzando come riferimento i lavori di Small (2001, 2004, 2005) e Small & Milesi (2013) relativi all'elaborazione di immagini Landsat di diverse aree del mondo. Gli endmembers individuati da tali lavori hanno costituito una base la scelta delle componenti nell'area di studio considerata, nella fase di elaborazione preliminare rispetto alle indagini sul campo.
2. Il successivo approccio ha invece previsto il supporto delle firme spettrali in situ nella scelta degli endmembers all'interno dell'immagine, in particolare quelli di suolo nudo.

4.3.4. Albero delle decisioni

Per ottenere una classificazione della tipologia di copertura a partire dalle abbondanze degli EM nei pixel dell'immagine, si segue un albero decisionale opportunamente generato che si basa su nodi di tipo "maggiore/minore" rispetto a dei precisi limiti (Figura 38), tale da risultare il più conservativo possibile.

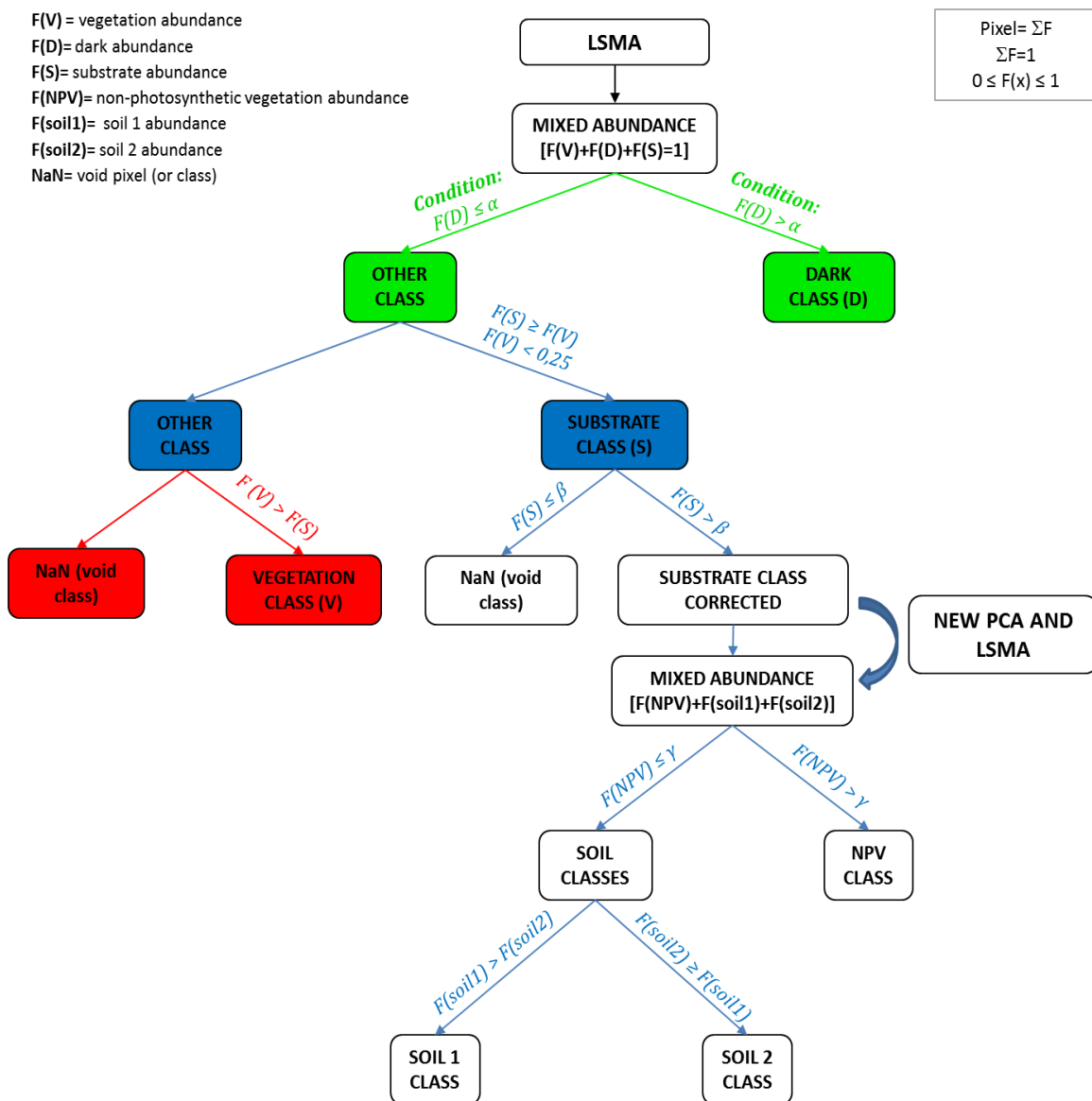


Figura 38. Classificazione tramite albero delle decisioni: l'uso di thresholds (relative alle abbondanze delle tipologie di copertura) per giungere alla realizzazione della mappa classificata dei suoli nudi (suolo 1 e suolo 2).

Queste soglie numeriche (thresholds; Tabella 6), sono state definite per le abbondanze delle tipologie di copertura e vengono costruite su vari livelli, a formare una struttura gerarchica, con l'obiettivo di individuare i suoli nudi. I limiti vengono decisi attraverso la visualizzazione dell'istogramma del Colour Manipulation in BEAM-VISAT relativo ad ogni abbondanza, enfatizzando i pixel appartenenti ad una specifica copertura. L'albero delle decisioni è uno strumento flessibile che si basa sulla logica di appartenenza o non appartenenza ad una

classe, fornendo un approccio empirico alla classificazione di immagini relative a porzioni di territorio eterogenee (ISPRA, 2010; Hladik et al., 2013; Valentini et al., 2015). In questo caso è stato costruito sulla base di specifiche caratteristiche ottiche e di rapporti ritenuti significativi tra le bande spettrali.

La classificazione delle immagini consiste nel processo che permette di ottenere mappe tematiche del territorio osservato, ossia decidere per ogni pixel cosa esso rappresenta in termini di copertura o di uso del terreno.

	15 marzo 2012	25 aprile 2012	04 gennaio 2015	01 aprile 2015	28 maggio 2015
α	0.65	0.70	0.80	0.80	0.80
β	0.20	0.15	0.15	0.15	0.15
γ	0.75	0.65	0.75	0.60	0.75

Tabella 6. Valori delle soglie utilizzate per le varie immagini elaborate.

4.4. ANALISI STATISTICA DELLE CLASSIFICAZIONI DI TESSITURE DEI SUOLI

Tramite un'analisi statistica si è cercato di correlare le abbondanze e le riflettanze, prodotti da EO, con le tessiture dei suoli ricavate dalla consultazione delle carte pedologiche della Regione Lombardia. L'obiettivo è constatare se una specifica abbondanza o riflettanza sia descrittiva di una o più classi tessiturali. Pertanto, le diverse tipologie di suolo identificate in funzione delle risposte radiometriche sono state relazionate con le informazioni tessiturali riscontrate mediante le carte pedologiche. Dalla carta pedologica di riconoscimento in scala 1:250.000 è stato possibile differenziare 7 tipi di classi tessiturali, mentre aumentando il dettaglio, crescono il numero delle tessiture che si distinguono (carta di semidettaglio, 1:50.000). Ad ogni UC (*Unità Cartografata*) è associato un numero intero progressivo, che la identifica univocamente.

Le tessiture sono elencate in ordine alfabetico:

- Nella carta di riconoscimento 1:250.000, le 7 classi tessiturali che rappresentano le cosiddette *consociazioni di suoli (CN)*. Sono delle UC costituite per almeno il 75 %, da un solo tipo di suolo o da suoli simili,

mentre la restante parte è costituita da suoli simili dal punto di vista tassonomico. L'UC prende il nome del suolo dominante.

- Nella carta di semidettaglio 1:50.000, oltre alle CN (che rappresentano le prime 7 classi tessiturali), sono illustrate le *associazioni di suoli (AS)* e *complessi di suoli (CO)*. Le AS sono delle UC costituite da un gruppo di suoli correlati geograficamente a componenti del paesaggio fisico, mentre i CO sono delle UC costituite da due o più suoli. In tutte le delineazioni (poligoni di suolo dell'UC) il modello distributivo e la proporzione quantitativa fra i diversi suoli è alquanto simile.

In seguito si riporta una schematizzazione delle tessiture e i relativi codici utilizzati nell'analisi (Tabella 7).

CARTA PEDOLOGICA 1:50.000	
TESSITURA	CODICE
argillosa	01
franca	02
franco argillosa	03
franco limosa	04
franco limoso argillosa	05
franco sabbiosa	06
sabbioso franca	07
franca - franco limosa	24
franca - franco sabbiosa	26
franca - sabbioso franca	27
franco argillosa - franca	32
franco limosa - franca	42
franco limoso argillosa - franca	52
franco sabbiosa - franca	62
franco sabbiosa - franco limosa	64
sabbioso franca - franco limoso argillosa	75

CARTA PEDOLOGICA 1:250.000	
TESSITURA	CODICE
Argillosa limosa	100
Franca	200
Franco argillosa	300
Franco limosa	400
Franco limosa argillosa	500
Franco sabbiosa	600
Sabbioso franca	700

Tabella 7. Tessiture e relativi codici utilizzati nell'analisi, a seconda della scala di osservazione.

L'analisi statistica ha previsto la realizzazione di due tipi di grafici: Box Plot e Violin Plot, mediante i quali si possono visualizzare le distribuzioni statistiche, calcolando per ogni classe tessiturale il primo e terzo intervallo quartile, la mediana, il valore massimo e minimo, elaborazione svolta con il software R (R Core Team, 2015), con il supporto del pacchetto 'rasterVis' (Lamigueiro & Hijmans, 2014).

4.4.1. Box Plot e Violin Plot

I Box Plots ed i Violin Plots sono delle rappresentazioni grafiche che forniscono una descrizione sintetica di un insieme di dati utilizzando semplici statistiche. Il *box and whiskers plot* (o più semplicemente box plot – diagramma a scatola e baffi) è un grafico che fornisce informazioni sia sulla variabilità che sull'asimmetria di una distribuzione statistica, ed è rappresentato dalle seguenti quantità (McGill et al., 1978; Cleveland, 1993): minimo, massimo, primo quartile (Q1), secondo quartile (Q2, cioè la mediana) e terzo quartile (Q3).

La lunghezza del box plot corrisponde alla *distanza interquartilica* (ovvero la differenza interquartile, $DI=Q3-Q1$) e viene suddivisa in due parti da un segmento interno che delimita la posizione della mediana della distribuzione. Inoltre, linee che si allungano dai bordi della scatola, dette *baffi* (whiskers, da qui box and whiskers plot) sono delimitati dal valore massimo e minimo (Figura 39).

Il Violin Plot è invece la combinazione di un box plot e un *kernel density plot*. Quest'ultimo è un metodo di rappresentazione della funzione di densità di probabilità di una variabile casuale continua.

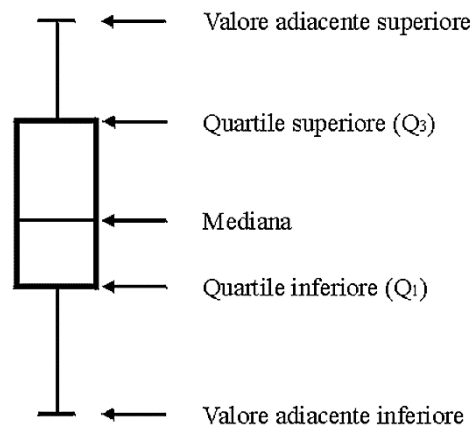


Figura 39. Schematizzazione di un Box Plot (da: McGill et al., 1978).

Capitolo 5

RISULTATI E DISCUSSIONI

5.1. RISULTATI

5.1.1. Analisi dei dati pluviometrici

Lo studio dei dati pluviometrici relativi al periodo in esame ha avuto come obiettivo quello di verificare le condizioni di umidità del terreno al momento del passaggio del satellite, e dedurre a cosa siano dovute le variazioni delle proprietà dei suoli. Innanzitutto, l'analisi ha previsto la selezione delle stazioni pluviometriche e termometriche presenti nell'area di studio, in modo tale da riuscire ad indagare il bilancio idroclimatico del suolo nelle diverse acquisizioni considerate, elemento utile per la valutazione del contenuto idrico dei suoli. Le stazioni meteo-climatiche di riferimento sono le seguenti:

- Cavenago d'Adda.
- Rivolta d'Adda.
- S. Angelo Lodigiano.
- S. Colombano al Lambro.
- Codogno.

In generale, il bilancio idroclimatico – BIC (o pioggia netta) è differenza espressa in mm tra le precipitazioni (P) e l'evapotraspirazione potenziale (E_{pi}). Il BIC è un indice per la valutazione del contenuto idrico dei suoli, quale saldo tra i mm in entrata (P) e quelli in uscita (E_p), consentendo di stimare le disponibilità idriche di un suolo, in relazione alle condizioni meteorologiche. L'evapotraspirazione è il processo tramite il quale l'acqua può tornare in atmosfera dal suolo, pertanto rappresenta un importante componente del bilancio idrico: poiché l'analisi è riferita a suoli nudi, assume particolare rilevanza la sola componente di evaporazione dell'acqua in essi contenuta. Il bilancio calcolato prende in esame la cumulata delle piogge cadute nei 5 giorni antecedenti la data di acquisizione, motivo per cui è più corretto parlare in termini di “*bilancio relativo*”. Un calcolo iniziale ha previsto la definizione degli indici di evapotraspirazione potenziale

mensili per gli anni 2012, 2014 e 2015, mediante l'applicazione del metodo proposto da Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Mather (1957). Si precisa che l'anno 2014 è stato considerato poiché il calcolo del bilancio dell'acquisizione 04 gennaio 2015, prevede la cumulata calcolata fino al 30 dicembre 2014. Di conseguenza, per semplicità, il valore Epi per tale scena è mediato tra i valori di dicembre 2014 e gennaio 2015. L'immagine del 28 maggio 2015 è stata scartata dall'analisi pluviometrica poiché quella meno rappresentativa dell'anno 2015.

Per le elaborazioni dei dati termometrici proposte da Thornthwaite e Mather è stato utilizzato il format di calcolo dell'evapotraspirazione disponibile sul sito web <http://www.fmulas.net/geologia/evapo/>, in cui sono necessarie solo le informazioni legate alla latitudine e alla temperatura media mensile. La formula di Thornthwaite (1948) si basa sulla relazione esponenziale tra evapotraspirazione potenziale e temperatura media mensile dell'aria (motivo per cui è strettamente legato alle condizioni meteo-climatiche). È un metodo che consente la stima della evapotraspirazione potenziale di riferimento, ricorrendo alla sola informazione sull'andamento delle temperature medie mensili. La relazione è la seguente:

$$E_{pi} = K[1.6(10T_i/I)a]$$

Con:

- Epi è l'evapotraspirazione potenziale media mensile (in mm/mese);
- K è il coefficiente di correzione di latitudine (o di irraggiamento) riferito al mese i-esimo ed è pari al rapporto tra le ore diurne e la metà (12) delle ore giornaliere;
- Ti è la temperatura media dell'aria del mese i-esimo (in C°);
- a è un fattore f(I), ed è

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1972 \times 10^{-5} I + 0.49239;$$

- I è l'indice annuo di calore.

In Tabella 8 sono riportati i valori di temperatura media mensile (T), evapotraspirazione potenziale mensile (Epi), precipitazione cumulata mensile e bilancio idroclimatico mensile, calcolati per gli anni 2012, 2014 e 2015.

2012				
	T (°C)	Epi (mm)	P (mm)	P - Epi
gennaio	1.7	0.9	17.9	17.0
febbraio	0.6	0.4	20.1	19.7
marzo	11.7	40.4	13.3	-27.1
aprile	12.6	50.0	101.7	51.7
maggio	18.2	98.3	77.2	-21.1
giugno	23.6	146.3	34.3	-112.0
luglio	24.9	161.0	18.1	-142.9
agosto	25.8	156.8	50.0	-106.8
settembre	19.3	87.2	97.6	10.4
ottobre	14.0	48.7	94.2	45.5
novembre	9.3	22.2	126.9	104.7
dicembre	1.2	1.0	40.6	39.6
totale		813.2	691.9	
l		63.883		
a		1.499		

2014				
	T (°C)	Epi (mm)	P (mm)	P - Epi
gennaio	5.1	9.1	152.6	143.5
febbraio	6.7	13.8	124.0	110.2
marzo	10.4	33.7	68.6	34.9
aprile	14.7	62.8	112.8	50.0
maggio	18.2	98.1	17.6	-80.5
giugno	23.3	143.4	101.2	-42.2
luglio	22.3	136.3	104.4	-31.9
agosto	21.9	122.5	112.6	-9.9
settembre	19.2	86.4	1.4	-85.0
ottobre	15.1	54.4	66.0	11.6
novembre	10.6	26.9	285.8	258.9
dicembre	5.0	8.2	65.6	57.4
totale		795.6	1212.6	
l		64.180		
a		1.503		

2015				
	T (°C)	Epi (mm)	P (mm)	P - Epi
gennaio	3.6	4.9	23.5	18.6
febbraio	3.7	5.2	115.4	110.2
marzo	9.5	28.0	47.7	19.7
aprile	14.0	56.6	72.6	16.0
maggio	19.4	106.4	74.7	-31.7
giugno	24.4	153.0	46.2	-106.8
luglio	27.9	191.3	9.4	-181.9
agosto	24.3	142.6	47.3	-95.3
settembre	19.1	84.4	45.6	-38.8
ottobre	13.3	43.5	72.6	29.1
novembre	8.4	17.9	15.6	-2.3
dicembre	4.7	6.9	3.3	-3.6
totale		840.7	573.8	
l		67.015		
a		1.550		

Tabella 8. Valori di temperatura media mensile (T), evapotraspirazione potenziale mensile (Epi), precipitazione cumulata mensile e bilancio idro-climatico mensile. La differenza "P-Epi" corrisponde al bilancio mensile.

Nel calcolo del bilancio idro-climatico, i valori positivi indicano condizioni di surplus idrico, mentre quelli negativi rappresentano condizioni di deficit idrico e condizioni siccitose in atto su quel territorio.

Questa tipologia di analisi assume una particolare importanza, in quanto fornisce delle informazioni legate all'umidità che potrebbe interessare le immagini selezionate: pertanto, è fondamentale realizzare queste analisi in anticipo.

Le scene Landsat elaborate non subiscono alcun effetto legato alle condizioni meteorologiche, a meno dell'immagine del 25 aprile 2012. Quest'ultima, poiché nei 5 giorni antecedenti l'acquisizione è stata soggetta a delle precipitazioni piuttosto intense, l'informazione spettrale in essa contenuta potrebbe essere legata all'effetto indotto dalle piogge.

In Tabella 9 si riportano i parametri necessari per giungere al calcolo del bilancio idrico relativo (pioggia utile):

- Pioggia cumulata dei 5 giorni antecedenti l'acquisizione della scena.
- Epi relativo al mese del periodo di pioggia considerato.
- Epi giornaliero (ovvero il valore di Epi mensile diviso per i giorni del mese).
- Perdita di acqua per evapotraspirazione (Epi giornaliero x 5 giorni).
- Bilancio idrico relativo, inteso come la differenza tra la pioggia caduta e la perdita per Epi nell'intervallo temporale considerato.

Il valore positivo di 14.1 mm dell'immagine del 25 aprile 2012 indica condizioni di surplus idrico legato alle precipitazioni, mentre quelli negativi rappresentano condizioni di deficit idrico e condizioni siccitose (di breve termine). Di conseguenza, la suddetta acquisizione potrebbe contenere informazioni spettrali legate all'azione meteorologica, in particolare delle piogge, che comporta un incremento dell'umidità e quindi delle riflettanze più basse e meno intense, in relazione all'assorbimento dell'energia irradiante da parte dell'acqua contenuta nei suoli (Baumgardner et al. 1985; Irons et al., 1989; Kasumov et al., 1992).

Data acquisizione	Pioggia (cumulata 5 giorni antecedenti)	EPI (periodo di pioggia)	EPI giornaliero	Perdita per Epi	BILANCIO IDRICO RELATIVO (Pioggia utile)
15 marzo 2012	0.0	40.4	1.3	6.5	-6.5
25 aprile 2012	22.4	50.0	1.7	8.3	14.1
04 gennaio 2015	0.0	6.3	0.2	1.0	-1.0
01 aprile 2015	0.0	28.0	0.9	4.7	-4.7

Tabella 9. Bilancio idrico relativo (pioggia utile): il valore positivo di 25 aprile 2012 indica condizioni di surplus idrico legato alle precipitazioni, mentre quelli negativi rappresentano condizioni di deficit idrico e condizioni siccitose (a breve termine).

5.1.2. Classificazione delle aree a copertura antropica

La mappatura delle coperture antropiche è basata sull'utilizzo della carta tematica del DUSAF (Figura 40): questa ha permesso la generazione di una maschera per la rimozione dell'antropico presente nell'area di studio, per ridurre il campione numerico su cui effettuare le analisi. L'esclusione delle aree con copertura antropica dai dataset telerilevati si è resa necessaria poiché la loro risposta radiometrica è molto simile a quella dei suoli nudi. Oltre alle classi del DUSAF, è stato eliminato il reticolo stradale principale aggiornato al 2015.

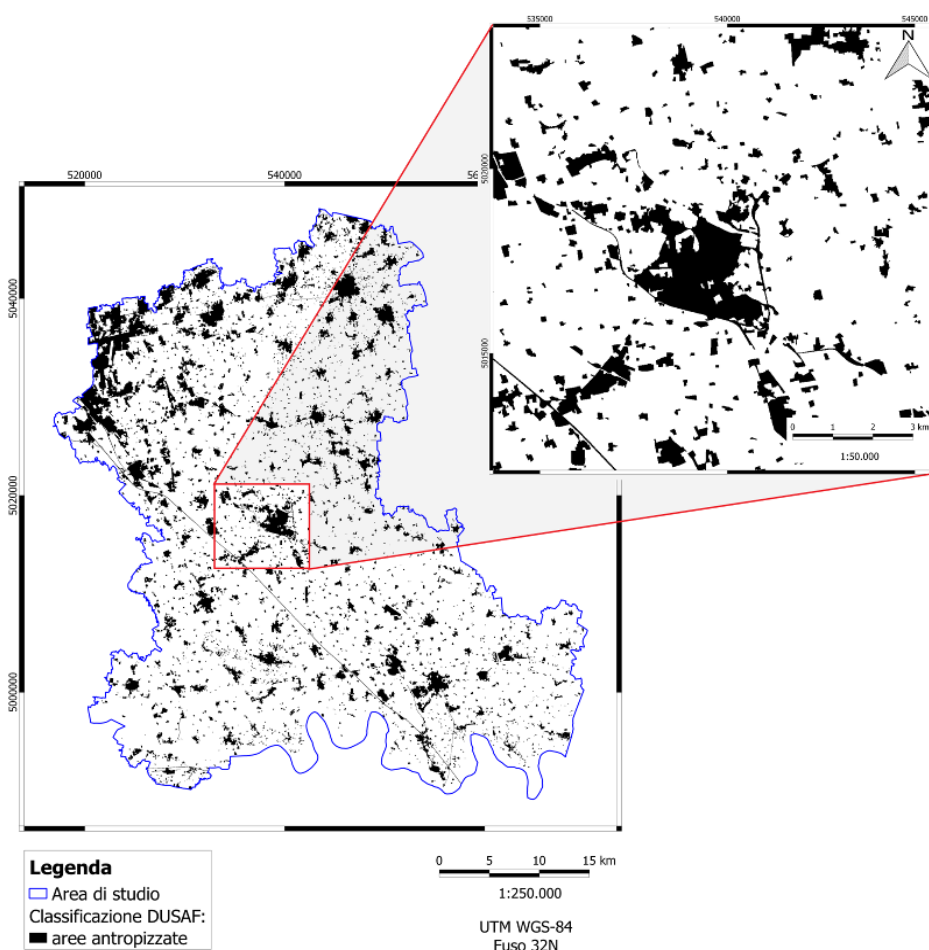


Figura 40. Mappa della copertura di tipo antropico, classificata dai dati DUSAF.

La superficie dell'intera area di studio è di 1803.6 km², 1525.5 km² sono l'area considerata agricola (84.6%), mentre 278.1 km² è la superficie ricoperta dall'antropico (15.4%; Figura 41).

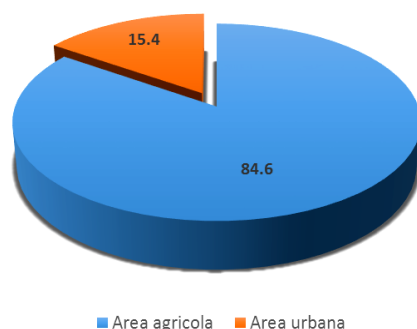


Figura 41. Discretizzazione dell'area di studio: 84.6% è l'area agricola, mentre 15.4% rappresenta le aree antropizzate.

5.1.3. Classificazione delle tessiture dei suoli sulla base delle carte pedologiche

Nell'area di studio, analizzando nel dettaglio le varie tipologie di suolo, sulla base delle informazioni riscontrate dalla consultazione delle carte pedologiche regionali, si evince che, dal punto di vista granulometrico e tessiturale, le tipologie di suolo più rappresentate sono le franche, ed in particolare quelle mediamente grossolane e grossolane (vedi Paragrafo 3.4).

Dalla carta pedologica di riconoscimento in scala 1:250.000, vengono differenziate 7 tipologie di classi tessiturali fondamentali, mentre dalla carta pedologica di semidettaglio in scala 1:50.000, vengono differenziate 16 tipologie di classi tessiturali (Tabella 10).

TESSITURA (1:250.000)	TESSITURA (1:50.000)
Argillosa limosa	argillosa
Franco limosa argillosa	franca
Franco argillosa	franco argillosa
Franco limosa	franco limosa
Franca	franco limoso argillosa
Franco sabbiosa	franco sabbiosa
Sabbioso franca	sabbioso franca
	franca - franco limosa
	franca - franco sabbiosa
	franca - sabbioso franca
	franco argillosa - franca
	franco limosa - franca
	franco limoso argillosa - franca
	franco sabbiosa - franca
	franco sabbiosa - franco limosa
	sabbioso franca - franco limoso argillosa

Tabella 10. Classi tessiturali rilevate dalla consultazione delle carte pedologiche a disposizione.

Le tessiture della carta 1:250.000 rappresentano le consociazioni di suoli (CN), ovvero delle Unità Cartografate (UC) costituite per almeno il 75 %, da un solo tipo di suolo, mentre la restante parte è costituita da suoli simili dal punto di vista tassonomico. Le percentuali delle classi tessiturali presenti nell'area di studio in funzione del tipo di carta pedologica utilizzata, vengo visualizzate in Figura 42 e Figura 43.

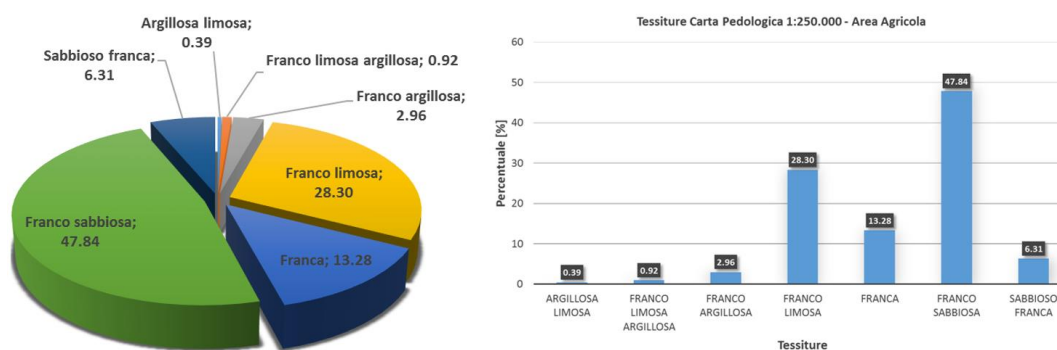


Figura 42. Percentuali delle diverse tipologie di tessiture riscontrate dalla consultazione della carta pedologica di riconoscimento 1:250.000, presenti nell'area di studio (rispetto all'area agricola, quindi non considerando l'antropico).

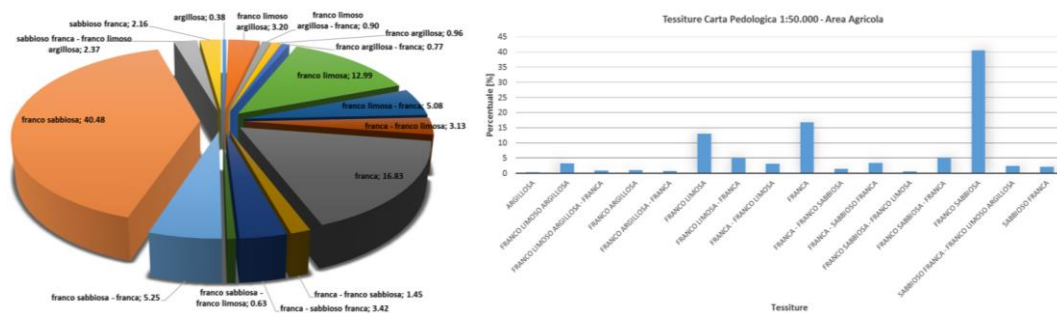


Figura 43. Percentuali delle diverse tipologie di tessiture riscontrate dalla consultazione della carta pedologica di semidettaglio 1:50.000, presenti nell'area di studio (rispetto all'area agricola, quindi non considerando l'antropico).

Le tessiture riscontrate dalla consultazione della carta al 1:50.000, oltre alle CN (che rappresentano le prime 7 classi tessiturali nella rappresentazione statistica dei boxplot e violin plot), sono descrittive delle associazioni di suoli (AS) e dei complessi di suoli (CO). Per tale motivo, in alcuni casi, tali tessiture sono costituite dall'unione di più classi tessiturali (gruppo di suoli correlati, come ad esempio la tessitura *franca – sabbioso franca*, *franco sabbiosa – franco limosa*).

A seguito di tali considerazioni, le percentuali granulometriche delle classi tessitureli “fondamentali” individuate, nella tassonomia americana delle terre fini sono così descritte (Tabella 11):

Codice	Tessitura	Valori soglia
A	Argillosa	40% o più di argilla, <45% di sabbia totale e <40% di limo
AL	Argillosa Limosa	40% o più di argilla e 40% o più di limo
FLA	Franco Limoso Argillosa	dal 27% (compreso) al 40% (escluso) di argilla e 20% o meno di sabbia
FA	Franco Argillosa	dal 27% (compreso) al 40% (escluso) di argilla e dal 20% (escluso) al 45% (compreso) di sabbia
FL	Franco Limosa	50% o più di limo e dal 12% (compreso) al 27% (escluso) di argilla, o dal 50% (compreso) al 80% (escluso) di limo e meno del 12% (escluso) di argilla
F	Franca	dal 7% (escluso) al 27% (escluso) di argilla, dal 28% (compreso) al 50% (escluso) di limo e 52% o meno di sabbia
FS	Franco Sabbiosa	20% o meno di argilla e 52% o più di sabbia e la percentuale di limo, più 2 volte la percentuale dell'argilla, è >30%; oppure contiene <7% di argilla, <50% di limo e 43-52% di sabbia
SF	Sabbioso Franca	al limite superiore contiene 85-90% di sabbia e la percentuale di limo, più 1.5 volte la percentuale di argilla, è 15 o più; il limite inferiore non contiene meno del 70-85% di sabbia e la percentuale di limo, più 2 volte quella dell'argilla, è 30 o meno

Tabella 11. Descrizione e soglie di contenuto delle “terre fini” (diametro < 2 mm) delle tessiture fondamentali individuate nell’area di studio (cartografia in scala 1:250.000).

5.1.4. Classificazione dei suoli nudi

A causa delle dimensioni inferiori dell’extent delle immagini L7 rispetto a quelle del L8 (vedi Paragrafo 3.1.2), per disporre di un’acquisizione che comprendesse l’intera area di studio, si è reso necessario realizzare un mosaico delle immagini appartenenti alla stessa strisciata (path: 194, row: 28 e 29), alle quali non è stata applicata alcuna trasformazione poiché appartenenti allo stesso sistema di coordinate geografiche.

L’estensione dell’area di studio è compresa all’interno delle coordinate N: 5055945, S: 4980945, E: 597615 e W: 492615, nel sistema di riferimento WGS84 UTM32N (EPSG: 32632), e corrispondenti ad un’immagine di dimensione (3500 x 2500 pixel), a 30 m di risoluzione spaziale.

Da letteratura, esistono molte tipologie di visualizzazione delle immagini in falsi colori: oltre alla convenzionale 4-3-2 RGB (nella quale la vegetazione acquisisce una tipica colorazione rossastra), risulta un ottimo strumento per discretizzare le principali coperture presenti in una scena (suolo, acqua e vegetazione), la composizione 7-4-2 RGB. Queste visualizzazioni meglio enfatizzano il contrasto

tra le varie coperture del suolo, mostrandone una chiara distinzione (AA. VV., 2005; Small, 2005; Bini et al., 2012; Small & Milesi, 2013).

In Figura 44, Figura 45 e Figura 46 vengono mostrate delle immagini relative ai dataset L7 e L8 in falsi colori (composizioni 4-3-2 RGB e 7-4-2 RGB per evidenziare il contrasto tra le diverse coperture), alla risoluzione spaziale di 30 m, alle quali è stata applicata la maschera per rimuovere l'informazione spettrale ricadente al di fuori dell'area di studio e quella corrispondente alla copertura dell'antropico (DUSAF). Inoltre, all'immagine del 25 aprile 2012 è stata applicata un'ulteriore maschera per eliminare una copertura nuvolosa presente in prossimità del limite SW dell'area di studio.

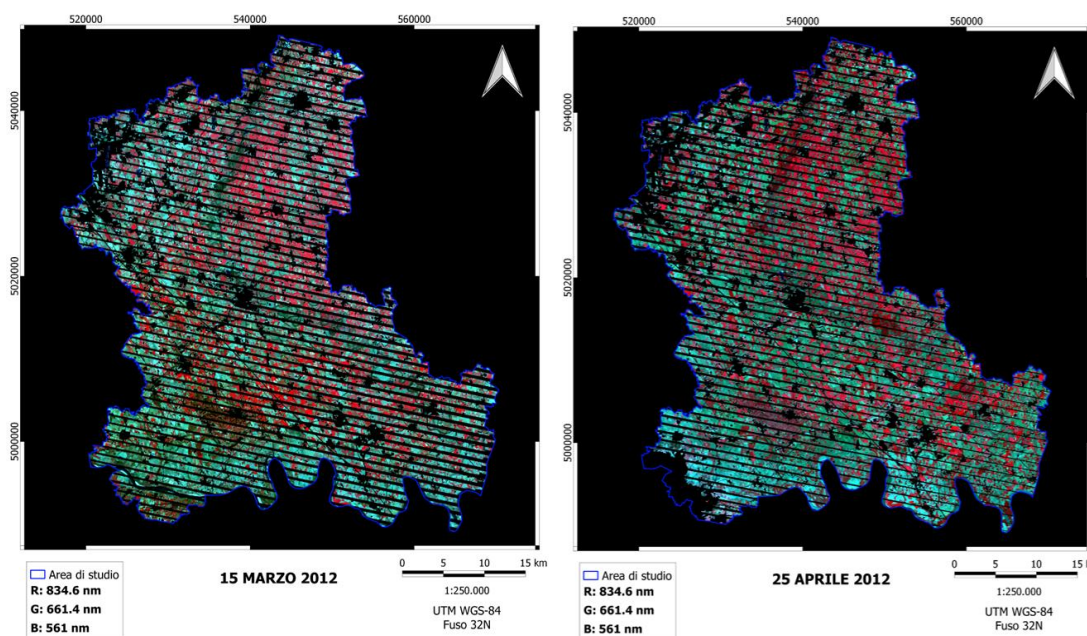


Figura 44. Immagini mascherate L7 in falsi colori (visualizzazione bande 4-3-2 RGB TOARefl, con riportate le specifiche delle lunghezze d'onda per ogni banda): dataset L7.

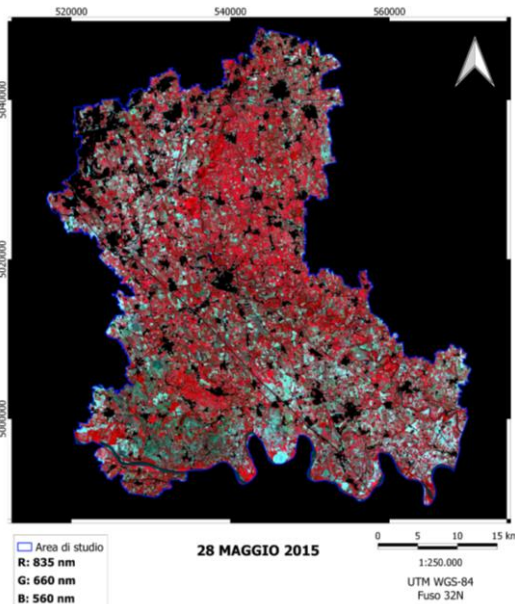
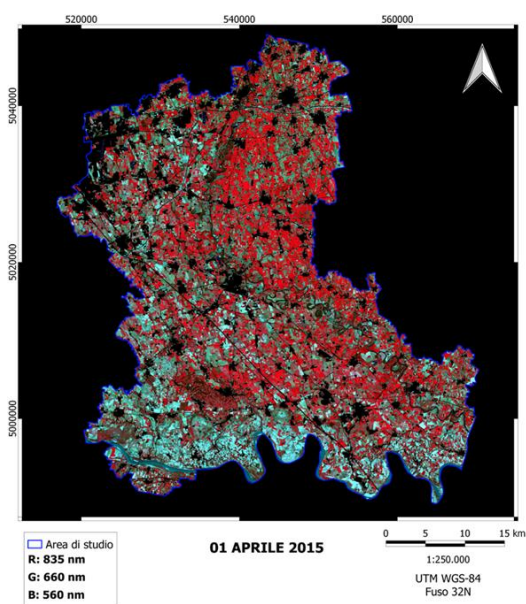
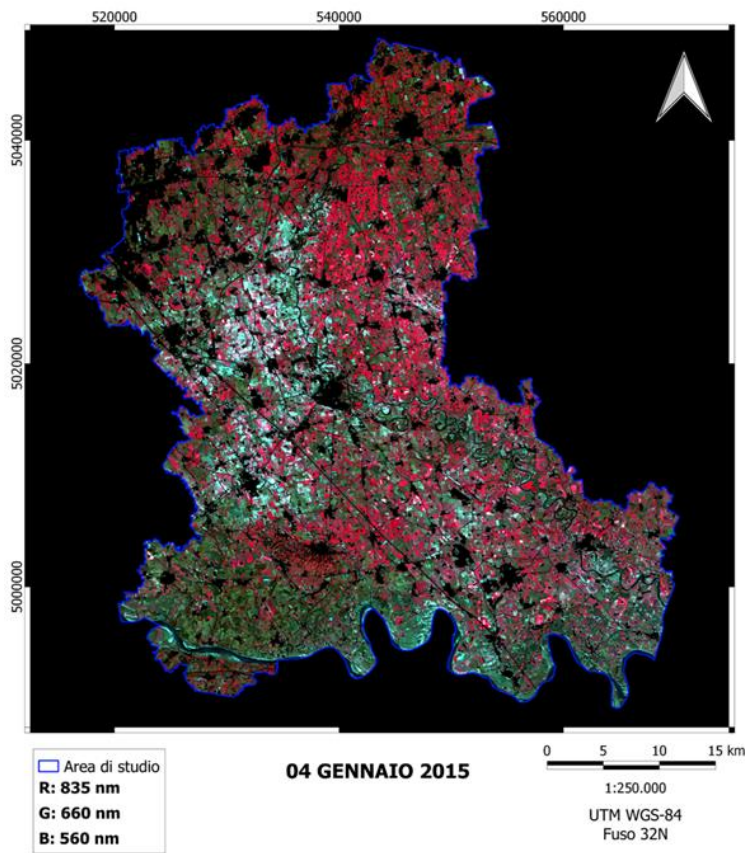


Figura 45. Immagini mascherate L8 in falsi colori alla risoluzione spaziale di 30 m (visualizzazione bande 4-3-2 RGB TOARefl, con riportate le specifiche delle lunghezze d'onda per ogni banda).

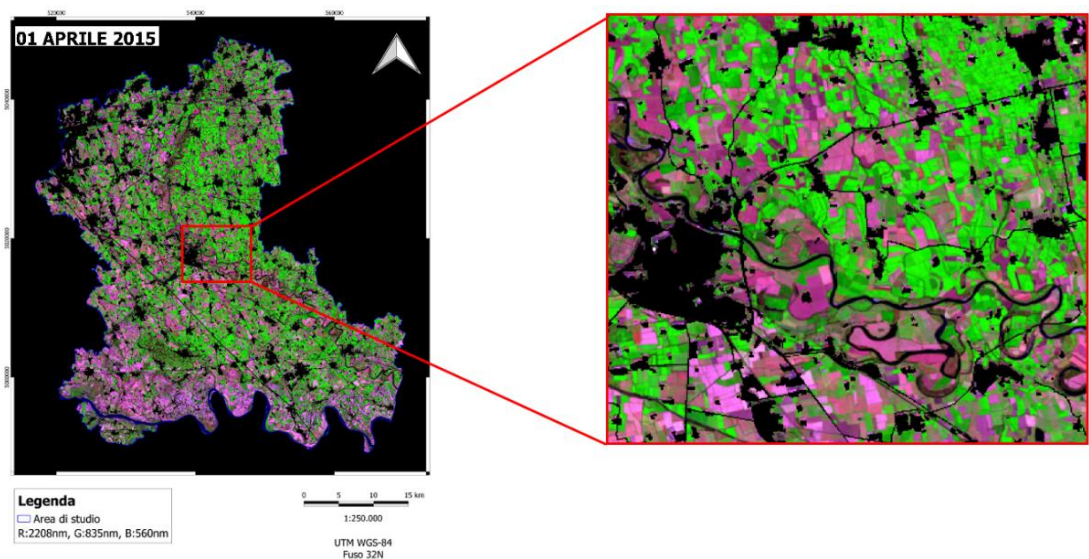


Figura 46. Visualizzazione in falsi colori delle bande 7-4-2 RGB TOARefl dell'immagine L8 (visibile/infrarosso) e relativo dettaglio: acquisizione del 01 aprile 2015.

A seguito dell'applicazione della maschera, la prima elaborazione operata sulla porzione di immagine selezionata è stata la PCA, mediante la quale viene valutata la variabilità del segnale degli elementi inclusi nella scena, quindi del contributo di ognuna delle Principal Components (PCs).

L'analisi dello spazio multidimensionale costruito con i 2D scatterplot delle prime 2 PCs (spazio cartesiano bidimensionale in cui vengono proiettati i pixel) ha consentito di distinguere gli elementi puri con differente comportamento spettrale. Agli apici delle distribuzioni (PC1 vs PC2), è possibile distinguere gli EM "primari" presenti nella scena. Le firme spettrali degli EM hanno consentito di analizzare la risposta di una matrice ambientale legata alle sue caratteristiche fisiche. Infatti, ogni EM è caratteristico di un preciso elemento a terra (ad es. suolo, vegetazione, acqua, ecc), con curve che presentano picchi spettrali e zone di assorbimento specifiche.

Agendo sul 2D scatterplot, si individuano dei cluster di punti alle estremità della nuvola, ognuno dei quali rappresenta un potenziale EM. È stato importante selezionare i punti più esterni perché più puri, quindi più rappresentativi per quella tipologia di copertura. Dallo scatterplot, e dai diversi cluster di pixel individuati, è stato scelto un numero limitato di EM, ognuno dei quali il più diverso possibile dagli altri. Quindi, sono stati selezionati quelli che si trovano

agli estremi della “coda” della nuvola di punti, aventi una firma spettrale molto diversa tra loro.

In accordo con Small (2001 e 2005), Small & Lu (2006) e Small & Milesi (2013), i tre vertici corrispondono a 3 endmembers (*primari*) che possono essere associati alle seguenti coperture fisiche naturali (Figura 47):

- ➔ *VEGETATION* (vegetazione; in rosso).
- ➔ *DARK* (acqua, superfici molto assorbenti e/o zone d’ombra; in verde).
- ➔ *SUBSTRATE* (substrato; in blu).

In particolare, la firma spettrale rappresentata in rosso (V, Vegetation) è caratterizzata dall’assorbimento della clorofilla nel VIS ($\lambda= 0.65 \mu\text{m}$) e dall’alta riflettanza nel NIR ($\lambda= 1 \mu\text{m}$); la firma spettrale rappresentata in verde (D, Dark) manifesta il forte assorbimento tipico dei corpi scuri, superfici poco riflettenti, corpi idrici, zone d’ombra e scattering atmosferico (Small & Milesi, 2013); infine, la firma spettrale in blu (S, Substrate) corrisponde al substrato, il quale è caratterizzato da un andamento crescente, fino al raggiungimento di un picco nel campo dello SWIR (1.7 μm). Secondo Small & Milesi (2013), l’EM *Substrate* include diversi elementi fisici naturali, quali rocce, sedimento, suolo e la vegetazione non-fotosintetica (Non-Photosynthetic Vegetation – NPV).

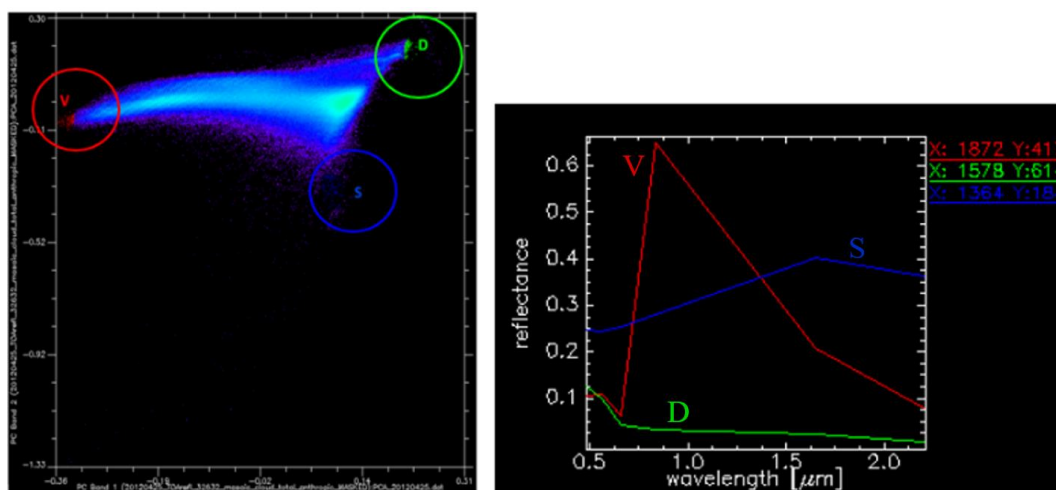


Figura 47. A sinistra, density-shaded scattergrams (banda 1 – banda 2); a destra, Endmember reflectance spectra: gli apici della nuvola di punti dello scatterogramma sono stati evidenziati con differenti colori per distinguere i diversi elementi presenti nell’immagine (V=Vegetation, S=Substrate, D=Dark).

In questa prima parte dell'elaborazione si è evidenziato come differenti matrici ambientali rispondano con segnali spettrali caratteristici e dipendenti dalla loro natura fisica.

Una volta definiti i valori di riflettanza delle firme spettrali degli elementi puri è possibile risolvere il segnale derivante dai pixel misti utilizzando il modello di equazioni lineari LSMM che, una volta risolto, fornisce la percentuale di abbondanza di ciascun EM per ogni pixel della scena (Paragrafo 4.3.1).

Seguendo i valori stabiliti in Tabella 6 e le indicazioni fornite dall'albero decisionale (Figura 38), è stato possibile ottenere le mappe delle coperture, sulla base degli EM individuati nella PCA. I prodotti della classificazione delle coperture nelle diverse acquisizioni sono riportati in Figura 48 e Figura 49.

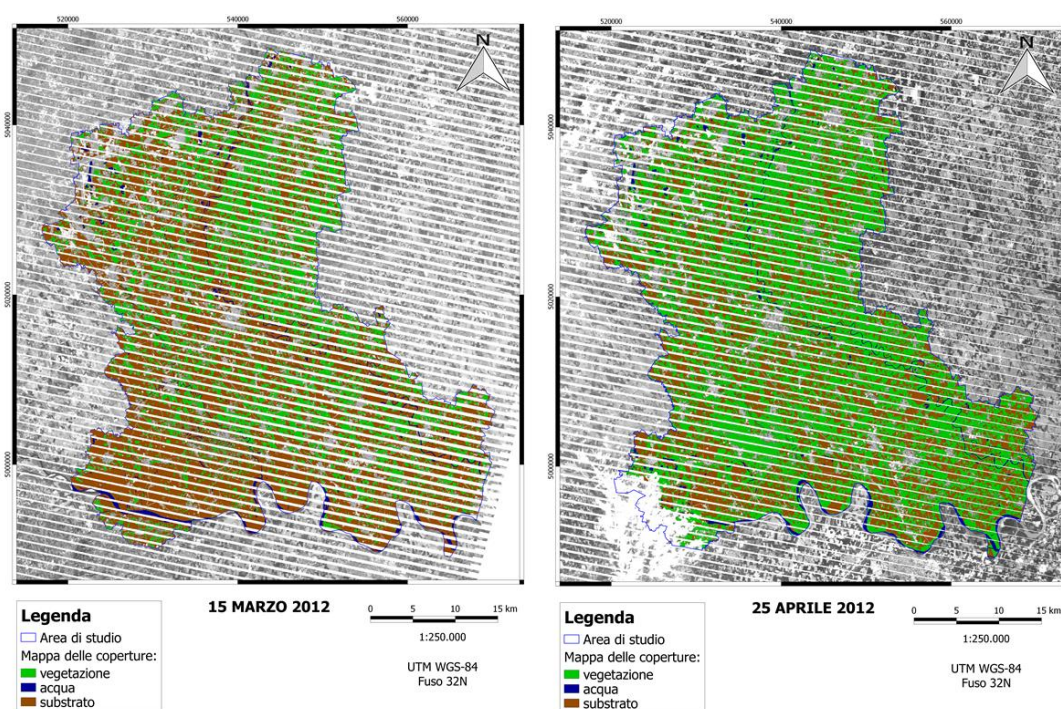


Figura 48. Mappe classificate delle coperture, risultante dalla LSMA e dall'albero delle decisioni, applicati alle immagini L7: sono individuati 3 classi di copertura: vegetazione (in verde), acqua (in blu) e substrato (in marrone).

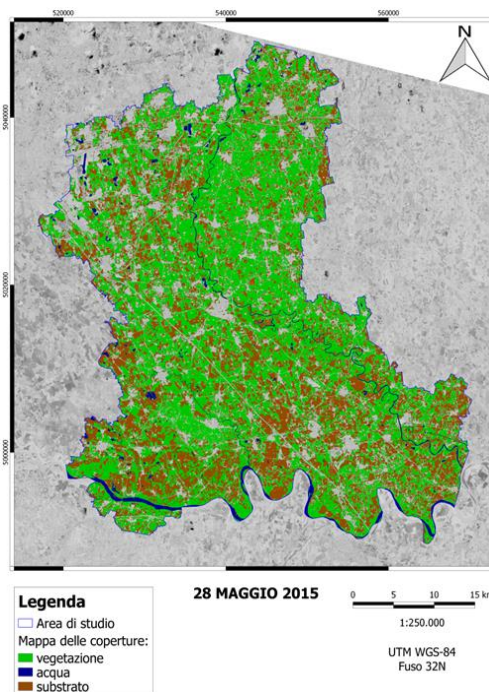
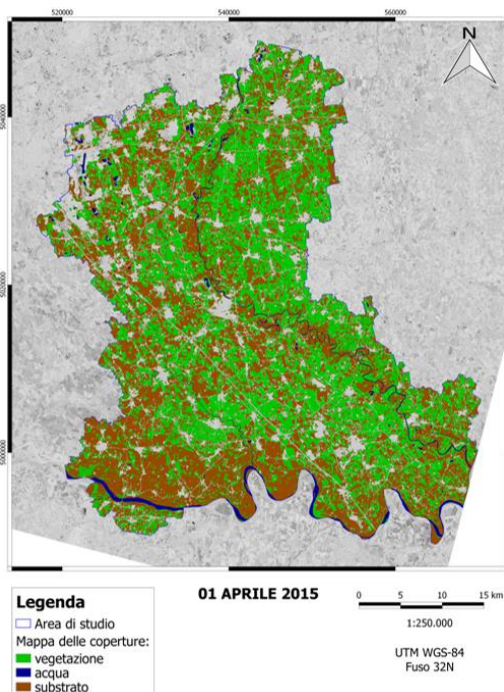
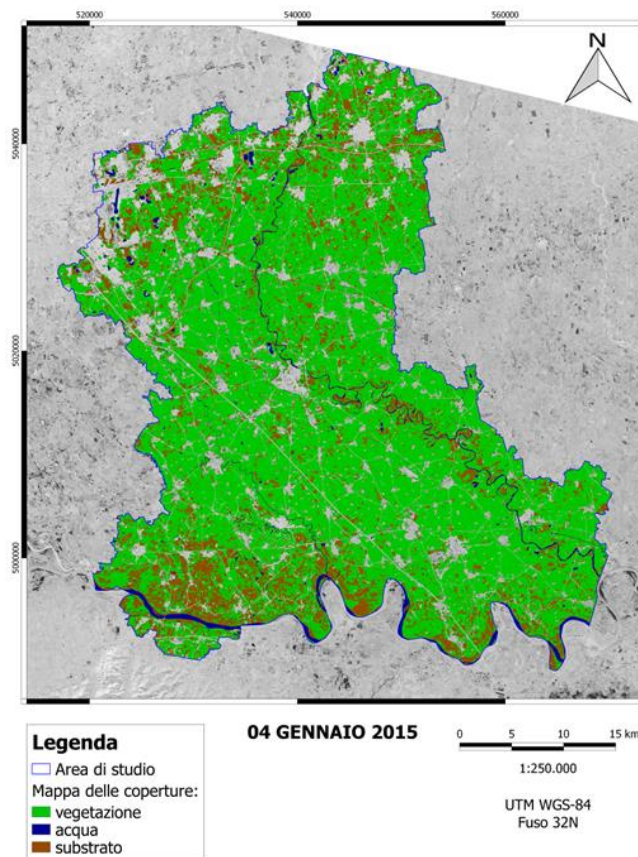


Figura 49. Mappe classificate delle coperture, risultante dalla LSMA e dall'albero delle decisioni applicati alle immagini L8: sono individuati 3 classi di copertura: vegetazione (in verde), acqua (in blu) e substrato (in marrone).

Per meglio visualizzare le differenti tipologie di coperture, in Figura 50 si riporta, a titolo di esempio, un ingrandimento di dettaglio della cover map relativa all'immagine L7 acquisita il 25 aprile 2012.

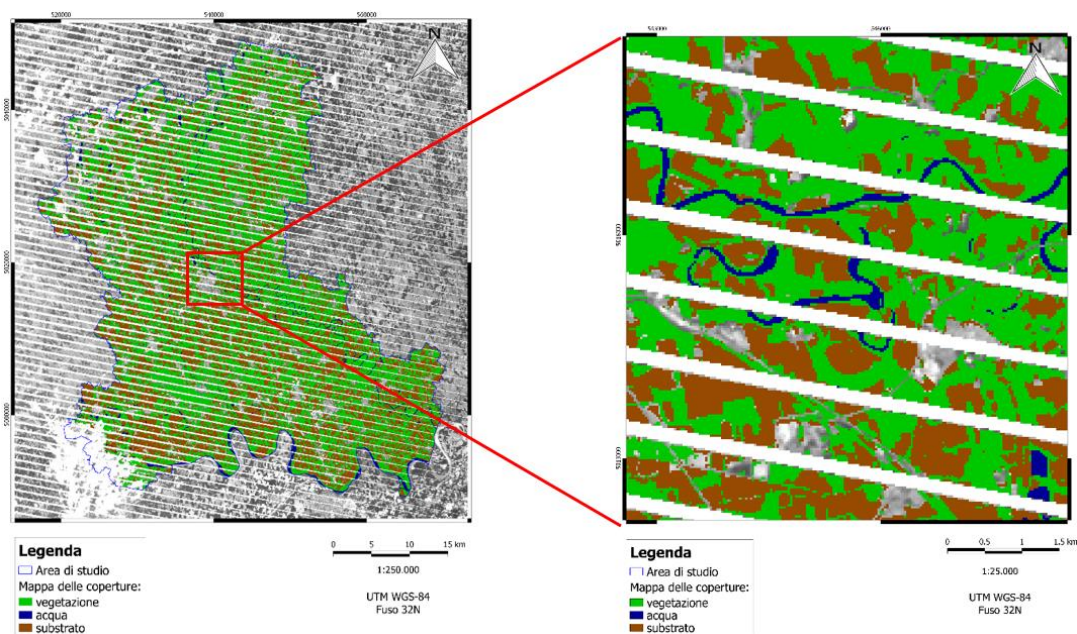


Figura 50. Esempio di dettaglio della cover map: immagine L7 del 25 aprile 2012.

Successivamente, dato che l'obiettivo centrale dell'analisi è la realizzazione di mappe di suolo nudo, l'attenzione si è focalizzata sulla classe di copertura "Substrate", tendendo in considerazione che tale tipologia di copertura include suoli, rocce, sedimenti e vegetazione non fotosintetica (NPV; Small & Milesi, 2013). A questo punto, è stato necessario considerare solo le aree corrispondenti alle coperture della classe *Substrate*. Analizzare nel dettaglio il substrato, porta a comprendere l'eventuale relazione del segnale con le caratteristiche granulometriche/tessiturali. Poiché il contesto di riferimento è un paesaggio di tipo agricolo, parcellizzato spazialmente in aree di dimensione superiore a 1 ha, alla mappa di copertura della classe *Substrate* è stato applicato un filtro spaziale per eliminare tutti gli aggregati di pixel contigui la cui area fosse minore di 1 ha. La mappa di copertura della classe *Substrate* è stata successivamente utilizzata come maschera per l'intera scena e applicata alle immagini di riflettanza Landsat, allo scopo di generare un dato dal quale sono state eliminate le risposte

radiometriche delle coperture corrispondenti alle classi antropico, vegetazione e dark (acqua).

Sulla nuova immagine mascherata, viene replicata l'intera procedura, ovvero la PCA, la LSMA e la classificazione secondo l'albero delle decisioni.

Dall'analisi delle componenti principali, sono state individuate 3 tipologie di EM:

- ➔ NPV (*Non-Photosynthetic Vegetation*).
- ➔ SOIL_1 (*suolo 1*).
- ➔ SOIL_2 (*suolo 2*).

In Figura 51 e in Figura 52 si riportano le mappe delle coperture dei suoli (suolo 1 e suolo 2) e della NPV, ricavata dall'unmixing eseguito sull'immagine mascherata con la copertura della classe substrato e un relativo ingrandimento di dettaglio in cui è possibile visualizzare il contrasto tra la copertura appartenente ai suoli (suolo 1 e suolo 2; in marrone) e quella della vegetazione non fotosintetica (NPV; in rosso).

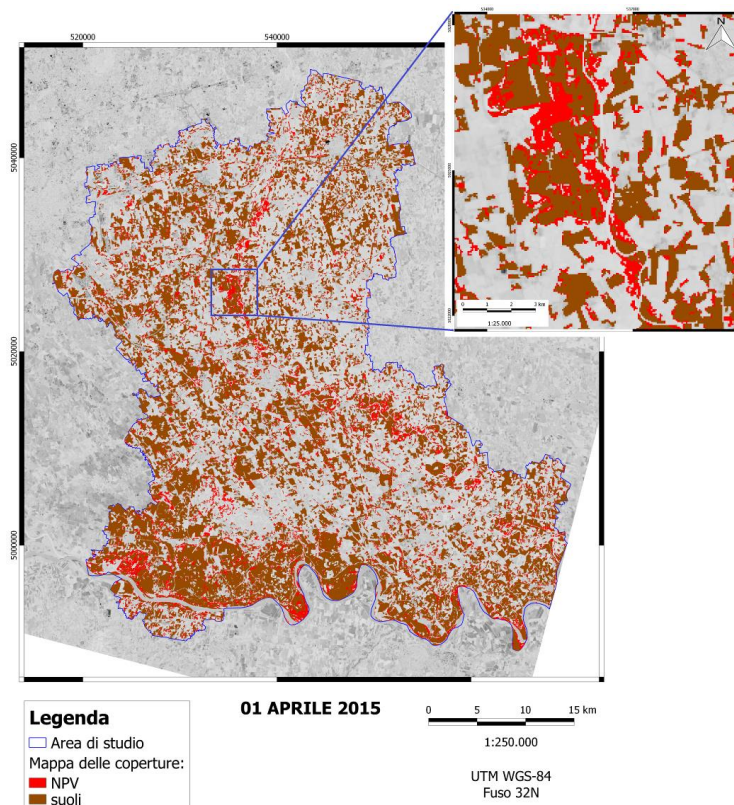


Figura 51. Esempio di dettaglio della mappa di copertura derivante dalla LSMA effettuata sull'immagine mascherata con la classe substrato: immagine L8 del 01 aprile 2015.

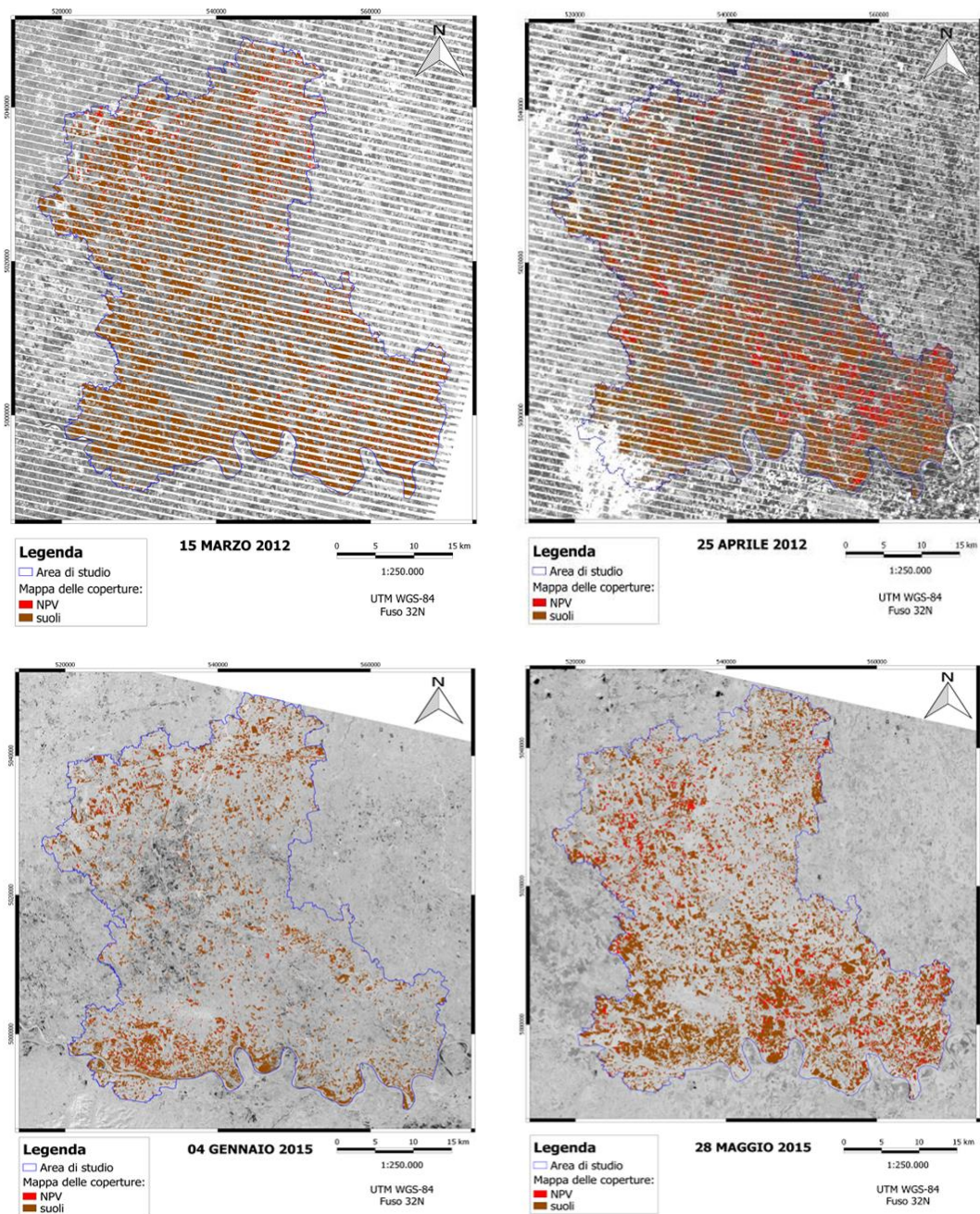


Figura 52. Mappe delle coperture derivanti dalla LSMA effettuata sull'immagine mascherata con la classe substrato.

Si deve precisare che, in considerazione del fatto che l'EM *Substrate* include rocce, sedimento, suolo e vegetazione non-fotosintetica (NPV), l'elemento fisico corrispondente alle rocce è stato escluso poiché siamo in presenza di un'area a forte vocazione agricola, caratterizzata spazialmente soprattutto dalla presenza di suoli sviluppati in sedimenti recenti legati all'ultima glaciazione.

La possibilità di visualizzare la risposta spettrale delle rocce è stata esclusa, poiché queste affiorano in un'area estremamente limitata (Paragrafo 2.3.1).

Al fine di inquadrare l'analisi solo sui suoli nudi, dal mixing space, è stato possibile individuare 3 EM, ognuno dei quali rappresentativo di una precisa copertura a terra (Figura 53): in rosso è rappresentata la NPV (che ovviamente non può essere considerata come suolo nudo), in verde il suolo 1 (quello con una risposta spettrale più intensa), mentre in blu il suolo 2 (quello con una risposta spettrale debole).

La riflettanza del suolo è una proprietà cumulativa risultante dal comportamento spettrale intrinseco di combinazioni eterogenee di minerali, sostanza organica, acqua, struttura e tessitura (Baumgardner et al. 1985). Inoltre, l'analisi visuale delle firme spettrali ha consentito di formulare delle valutazioni qualitative sulle proprietà di suoli sconosciuti, per confronto con spettri di suoli noti ottenuti dalla campagna radiometrica.

Per focalizzare l'attenzione sui suoli nudi, si sono esportate le classi dei suoli, nel tentativo di scomporre il segnale caratteristico dell'elemento, cercando di ottenere esclusivamente quei pixel che rappresentano i suoli nudi (*bare soils*). La copertura dei suoli è stata utilizzata come maschera da applicare sui dati Landsat che, in questo caso, ha prodotto un'immagine mascherata che contiene tutti quei pixel identificabili esclusivamente come suoli nudi (suolo 1 e suolo 2). Spetttralmente, è stato possibile differenziare solo due tipologie di suoli nudi.

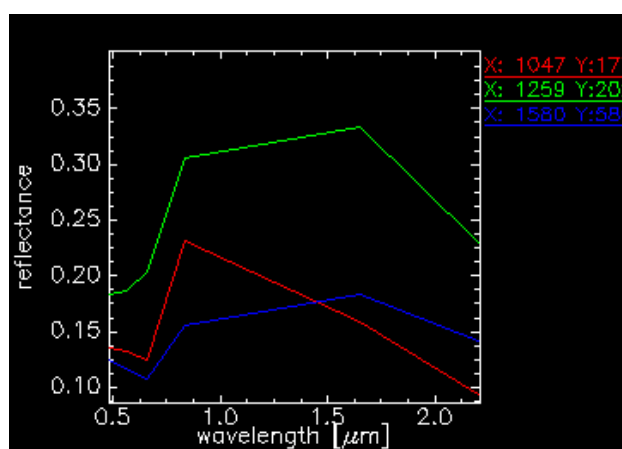


Figura 53. Endmember reflectance spectra: in rosso la NPV, in verde il suolo 1 e in blu il suolo 2 (acquisizione L7, 25 aprile 2012).

In un secondo momento, le classi di copertura “suolo 1” e “suolo 2”, hanno permesso di realizzare una carta delle abbondanze dei suoli nudi, dalla quale è stata ottenuta anche un mappa classificata dei suoli mediante le regole dell’albero delle decisioni, con la quale è stato possibile definire due classi di suoli (Figura 54 e Figura 55).

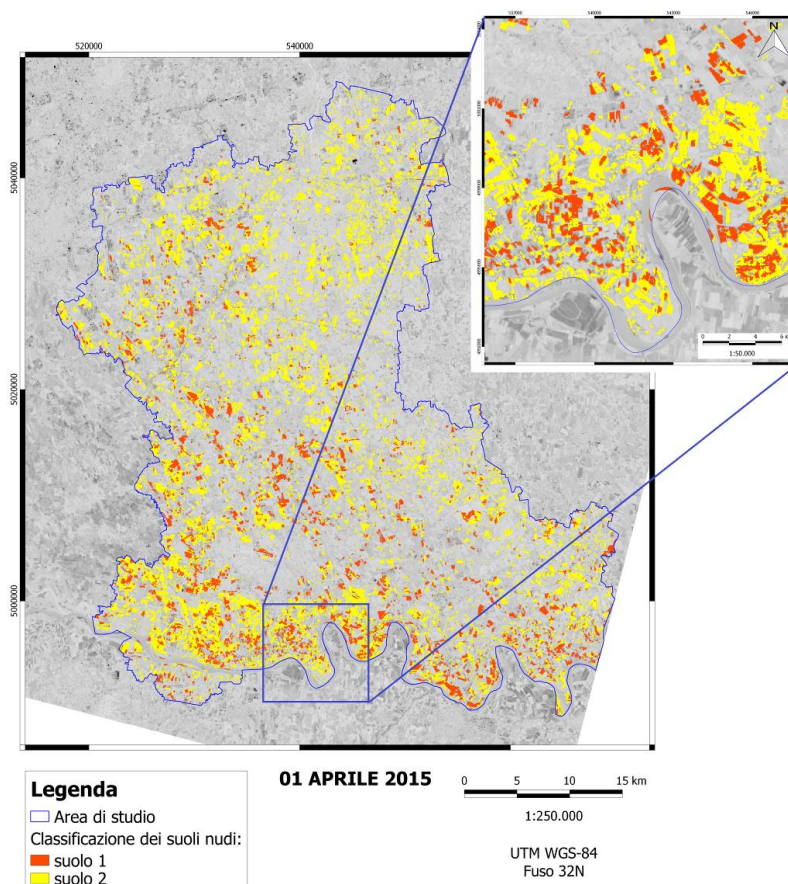


Figura 54. Esempio di dettaglio della mappa classificata dei suoli nudi: immagine L8 del 01 aprile 2015.

Il suolo 1, in arancione, è quella tipologia di copertura caratterizzata da una firma spettrale molto più intensa rispetto a quella del suolo 2, evidenziato in giallo. Le variazioni delle firme spettrali dei suoli sono dovute a diversi fattori, primo tra tutti il contenuto idrico (soil moisture), e in secondo luogo la tessitura/struttura del suolo, la mineralogia, il contenuto organico, e quindi il colore. Perciò, si presume che le due tipologie di suoli discriminati da remoto possano distinguersi

soprattutto per caratteristiche fisiche (legate a tessitura e/o umidità). Per trovare la correlazione che risponda a tale quesito, è stata fatta un'apposita analisi statistica.

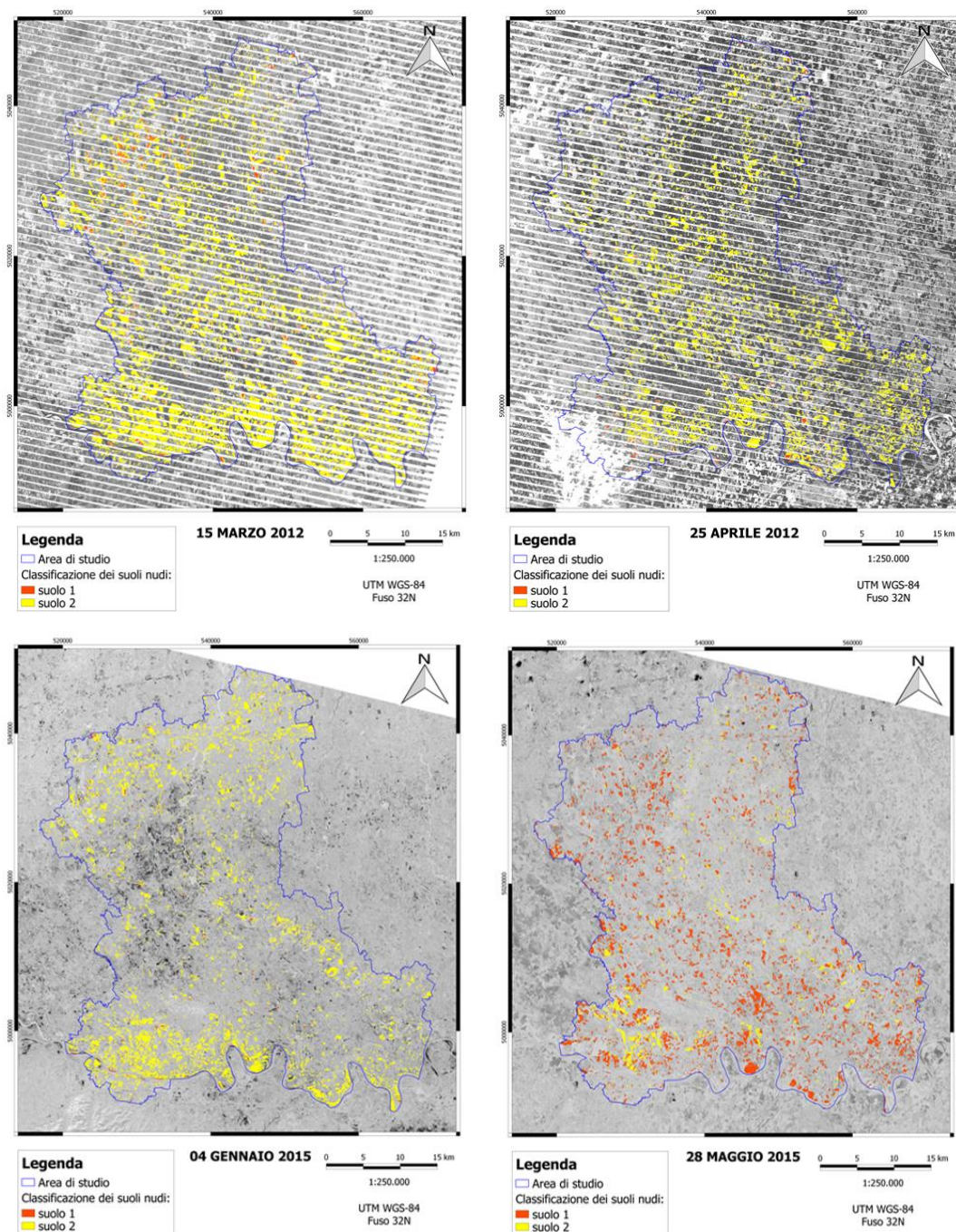


Figura 55. Mappa della copertura della classe suoli nudi: classificazione dei suoli nudi, in cui si sono distinti due tipologie di suoli, basandosi sulla risposta spettrale. In arancione si evidenzia il suolo con la firma spettrale con valori di riflettanza più elevati, e in giallo la copertura di suolo con la firma spettrale meno intensa.

Relativamente ai risultati dell'anno 2012, i suoli nudi del 25 aprile, rispetto a quelli del 15 marzo, tendono ad aumentare nel contenuto della classe suolo 2 (firma spettrale meno intensa). Si verifica una diminuzione della copertura suolo 1 da marzo ad aprile 2012, e questo potrebbe essere legato alle condizioni climatiche, ed in particolare, alle piogge che influiscono sulla intensità della firma spettrale, come ben esposto nella letteratura internazionale (vedi Paragrafo 5.1.1). L'immagine del 28 maggio 2015 è stata scartata dalle analisi poiché quella meno rappresentativa dell'anno 2015, in termini quantitativi. Nella Tabella 12 si riportano i dettagli delle mappe classificate dei suoli nudi. In particolare, sono mostrate le statistiche riguardanti la distribuzione spaziale: il numero dei pixel della copertura complessiva dei suoli nudi, la relativa superficie e la percentuale rispetto all'area di studio totale (circa 1800 km²).

SOILS COVER MAP	n° pixel totale	Area totale (kmq)	% area di studio
15 marzo 2012	288169	259.35	14.4%
25 aprile 2012	169602	152.64	8.5%
04 gennaio 2015	186601	167.94	9.3%
01 aprile 2015	435365	391.83	21.7%
28 maggio 2015	173904	156.51	8.7%

Tabella 12. Statistiche riguardanti la distribuzione spaziale della copertura complessiva dei suoli nudi.

Per ottenere la mappa di copertura dei suoli nudi (cioè le maschere nelle quali si assume come valore nullo tutto ciò che non sia suolo nudo), è stato necessario considerare solo le abbondanze suolo 1 e suolo 2 (vedi Appendice A).

5.1.5. Radiometria di campo

Superata la prima metà della stagione primaverile, nelle aree agricole la vegetazione è in piena fase di crescita e, dal punto di vista quantitativo, i suoli nudi ricoprono una superficie molto limitata. Di conseguenza, l'elaborazione dei dati satellitari relativa a tale acquisizione è stata utilizzata esclusivamente per il confronto e la validazione dei dati di riflettanza delle firme spettrali. Confrontando le tre firme ricavate dalla PCA con quelle di campo, è possibile dare una interpretazione alle risposte spettrali (Figura 56).

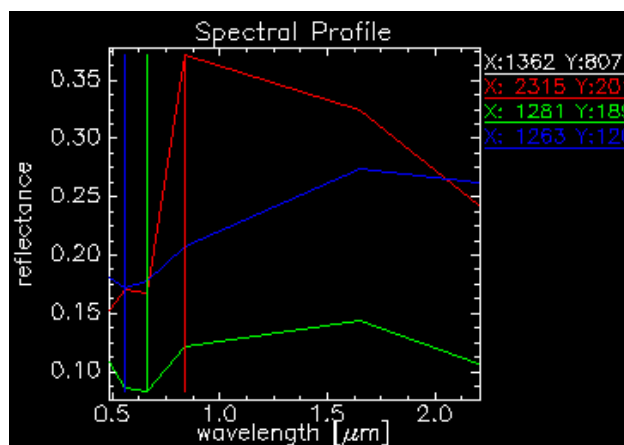


Figura 56. Endmember reflectance spectra degli EM corrispondenti alla classe suolo da PCA su dato Landsat L7: in rosso la NPV, in blu il suolo 1 e in verde il suolo 2.

Nel grafico in Figura 57, è possibile osservare il confronto tra le firme di campo e le risposte degli EM selezionati nella PCA (NPV, suolo 1 e suolo 2): la riflettanza più alta (in rosso la NPV), assume lo stesso andamento dell'elemento fisico che si presentava come vegetazione non fotosintetica (secca) durante la campagna di rilevamento; quelle rappresentate in blu e in verde, invece, sono quelle rappresentative dei suoli nudi (denominati rispettivamente suolo 1 e suolo 2 nella classificazione dei suoli).

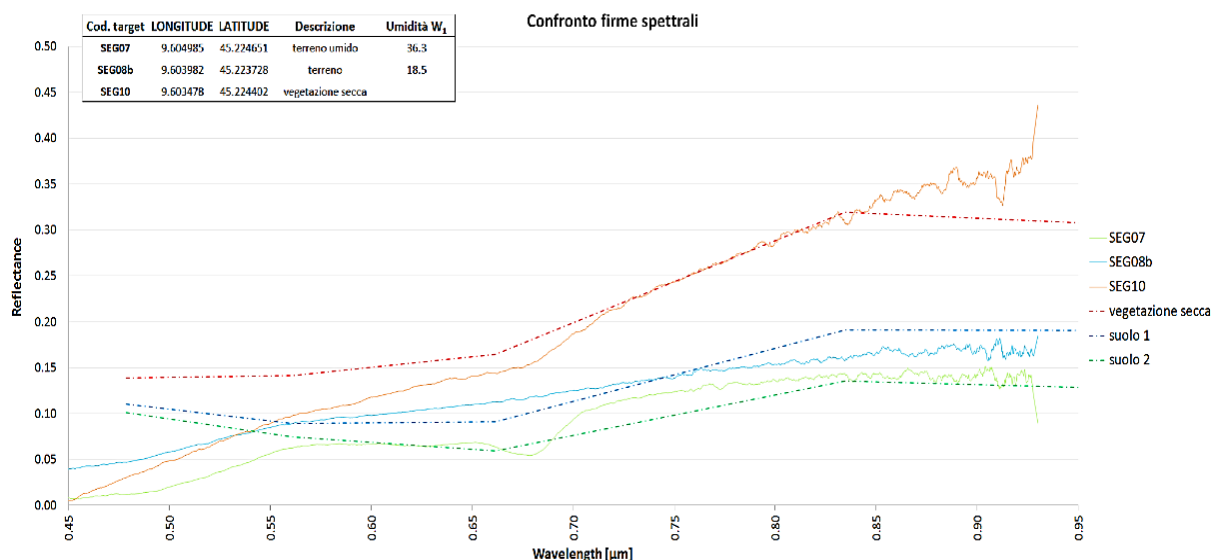


Figura 57. Confronto tra le firme di campo (linee continue) e le risposte spettrali degli EM della PCA (linee tratteggiate).

La differente risposta spettrale tra i due tipi suoli è dovuta a diversi fattori, dato che questa è una proprietà cumulativa risultante dal comportamento spettrale intrinseco di combinazioni eterogenee di minerali, sostanza organica, contenuto d'acqua, la rugosità superficiale del suolo, contenuto di ferro, struttura e tessitura (Stoner & Baumgardner, 1981; Baumgardner et al. 1985; Mulders, 1987; Irons et al., 1989; Coleman et al., 1991; Kasumov et al., 1992; Lillesand & Kiefer, 1994; Croft et al., 2012).

5.1.6. Classificazione dei suoli nudi sulla base dell'analisi statistica

Per poter classificare i suoli nudi sono state utilizzate due tipologie analisi statistiche: *Box/Whiskers Plots* e *Violin Plots*. Attraverso queste analisi si possono visualizzare le distribuzioni statistiche dei suoli nudi, calcolando per ogni classe tessiturale il primo e terzo intervallo quartile, la mediana, il valore massimo e minimo, cercando una correlazione tra le tessiture e i prodotti EO da dati Landsat. Dall'osservazione dei *Box/Whiskers Plots* (Figura 58; Appendice B e C) si evince come l'abbondanza del suolo 1 sia caratterizzata prevalentemente da classi tessiturali grossolane (in alcuni casi sono assenti le classi più fini, come la classe franco limoso argillosa), mentre l'abbondanza del suolo 2 è maggiormente rappresentata dalle tessiture granulometricamente più fini, che sono appunto le classi dominanti. Dal punto di vista spettrale, il suolo 1 è quello che ha una firma più intensa, mentre il suolo 2 ha una risposta più debole, anche se l'andamento è molto simile. Questa differenza di intensità delle risposte spettrali potrebbe essere legata a diversi fattori, primi tra questi il contenuto idrico (soil moisture), che di conseguenza ne determina il colore (assieme al contenuto di sostanza organica), in relazione alla granulometria e alla tessitura. Il contenuto idrico del suolo è strettamente legato alla composizione granulometrica, e quindi alla tessitura (Novák et al., 2013): i suoli più fini, a causa del minore drenaggio, tendono ad essere più umidi, perciò sono caratterizzati da una firma spettrale meno intensa rispetto ai suoli grossolani (ad es., sabbiosi) che sono solitamente ben drenati. L'immagine del 28 maggio 2015 è stata scartata dalla suddetta analisi poiché quella meno rappresentativa dell'anno 2015, in termini quantitativi.

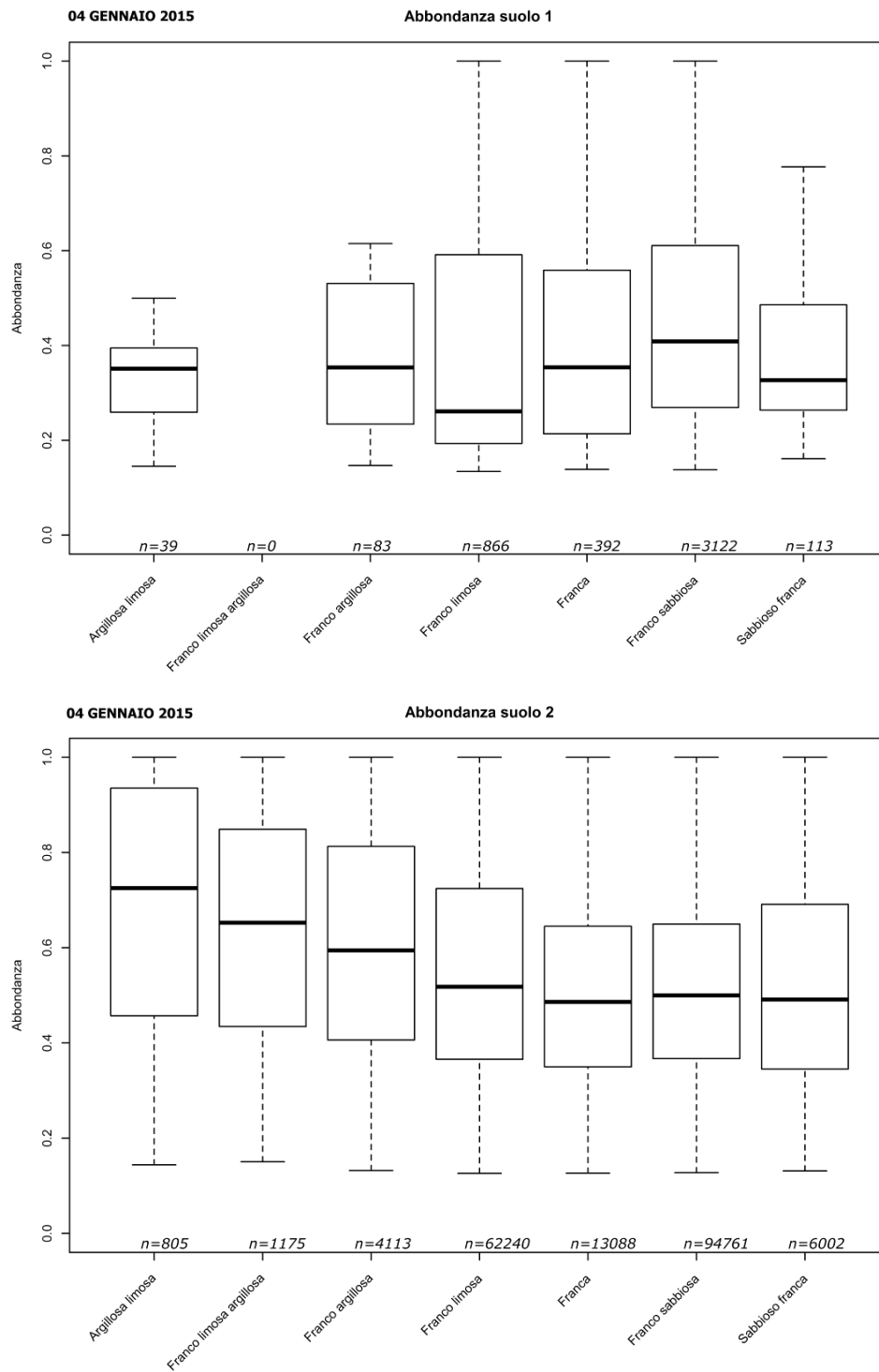


Figura 58. Box/Whiskers Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 (in alto) e delle abbondanze del suolo 2 (in basso), in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000. Il termine "n" indica il numero di pixel per quella precisa tessitura, su extent Landsat con risoluzione di 30 m.

Analizzando anche i Violin Plots (Figura 59; Appendice D ed E), si nota come nel suolo 1 le tessiture più fini hanno un andamento bimodale (argillosa limosa, franco argillosa), al contrario di quanto avviene nelle classi più grossolane che tendono ad avere un andamento “a goccia”.

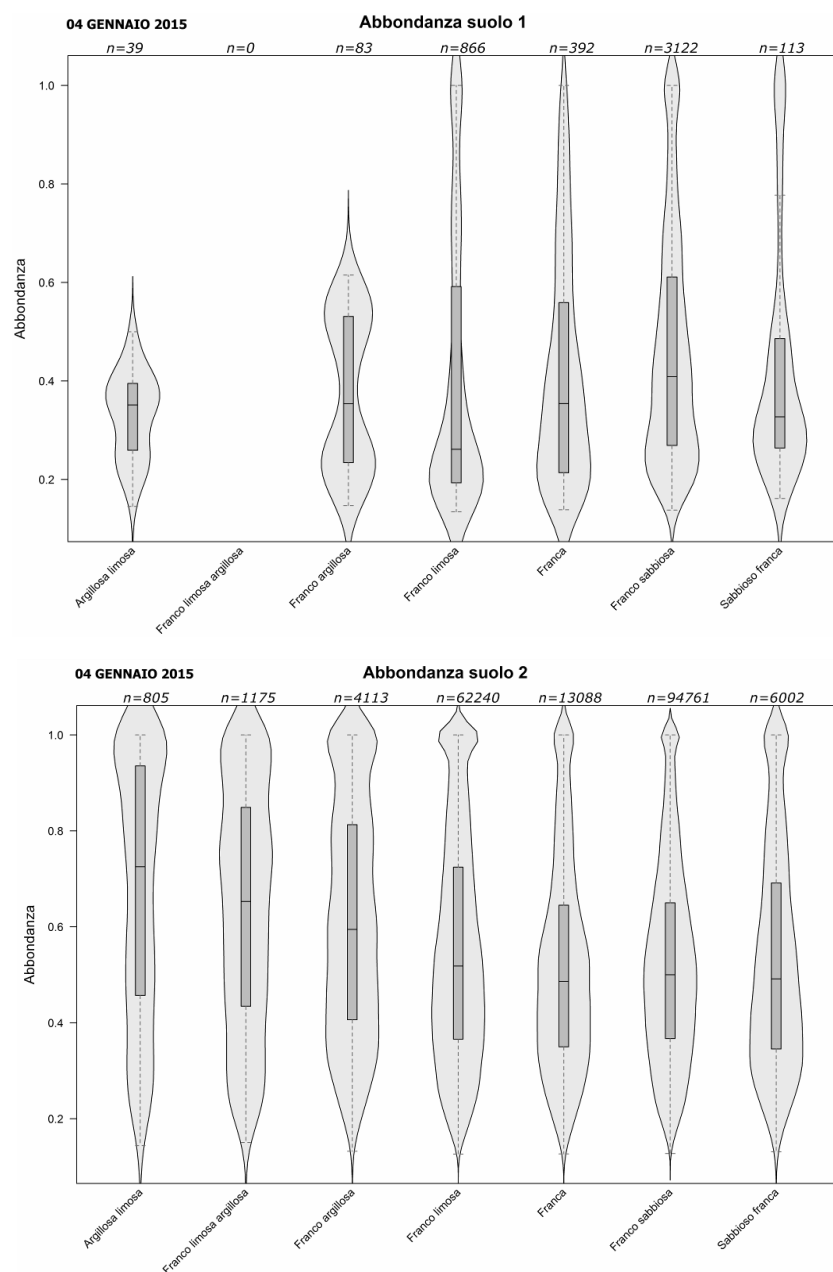


Figura 59. Violin Plots dell’acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 1 (in alto) e delle abbondanze del suolo 2 (in basso), in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000. Il termine “n” indica il numero di pixel per quella precisa tessitura, su extent Landsat con risoluzione di 30 m.

Anche nelle abbondanze del suolo 2, le tessiture più fini hanno un andamento opposto rispetto alle altre 4 classi tessiturali, che sono le più rappresentative dell'abbondanza del suolo 2. In questo caso, gli andamenti sono tutti "a goccia", ma la differenza risiede nell'andamento opposto dei plot.

L'analisi statistica ha inoltre previsto lo studio delle riflettanze, per verificare se una banda sia caratteristica di una classe tessiturale specifica.

Le bande spettrali considerate, che per le loro caratteristiche tecniche hanno la potenzialità di discriminare il contenuto idrico dei suoli (soil moisture), sono le seguenti (vedi Paragrafo 3.1.2 – Tabella 2; fonte: <http://landsat.usgs.gov>):

- Banda 5 (*Short-Wave Infrared – SWIR*), con $\lambda = 1.55 - 1.75 \mu\text{m}$, per la piattaforma L7.
- Banda 6 (*Short-Wave Infrared – SWIR*), con $\lambda = 1.57 - 1.65 \mu\text{m}$, per il satellite L8 (l'equivalente della Banda 5 del L7).

Dall'osservazione dei risultati (Figura 60; Appendice F e G), si evince come le classi tessiturali costituite prevalentemente da materiale più fine, presentano delle riflettanze più basse e quindi meno intense, e questo può essere legato all'assorbimento dell'energia irradiante da parte dell'acqua in essi contenuta (Stoner & Baumgardner, 1981; Baumgardner et al. 1985; Mulders, 1987; Irons et al., 1989; Coleman et al., 1991; Kasumov et al., 1992; Lillesand & Kiefer, 1994; Croft et al., 2012).

Come riportato da Saxton et al. (1986), Mulders, (1987), Irons et al. (1989), Kasumov et al. (1992) e Saxton & Rawls (2006), i terreni più fini hanno la tendenza a trattenere per più tempo l'acqua al proprio interno.

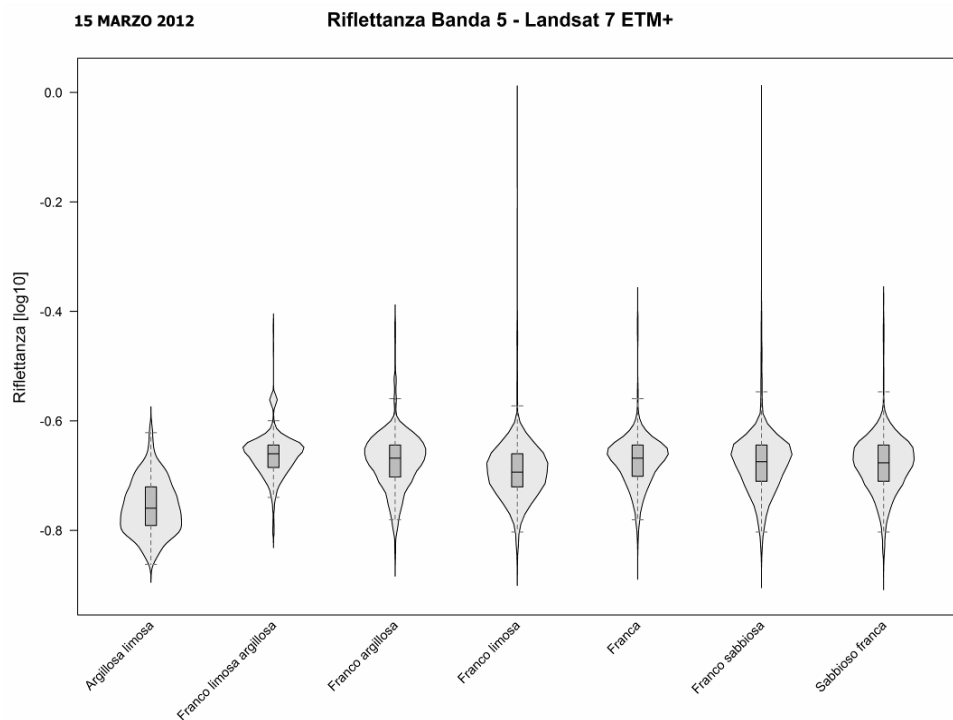
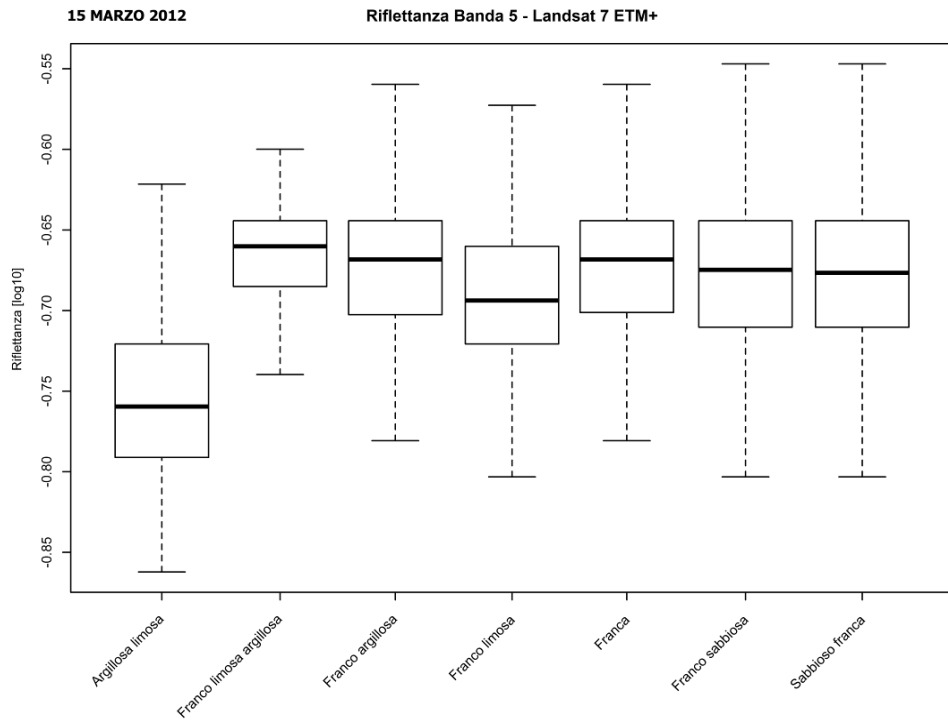


Figura 60. Box/Whiskers Plots (in alto) e Violin Plots (in basso) dell'acquisizione più rappresentativa, in questo caso del 12 marzo 2012: confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle riflettanze relate con le classi tessiture della carta pedologica al 1:250.000.

Replicando l'analisi statistica per la classificazione dei suoli nudi utilizzando in questo caso le informazioni della carta pedologica al 1:50.000, l'abbondanza di *suolo 1* è ancora rappresentata da materiali granulometricamente più grossolani, mentre l'abbondanza di *suolo 2* è caratterizzata da alti valori nelle classi tessiturali più fini, come illustrato in Figura 61, Appendice H ed I.

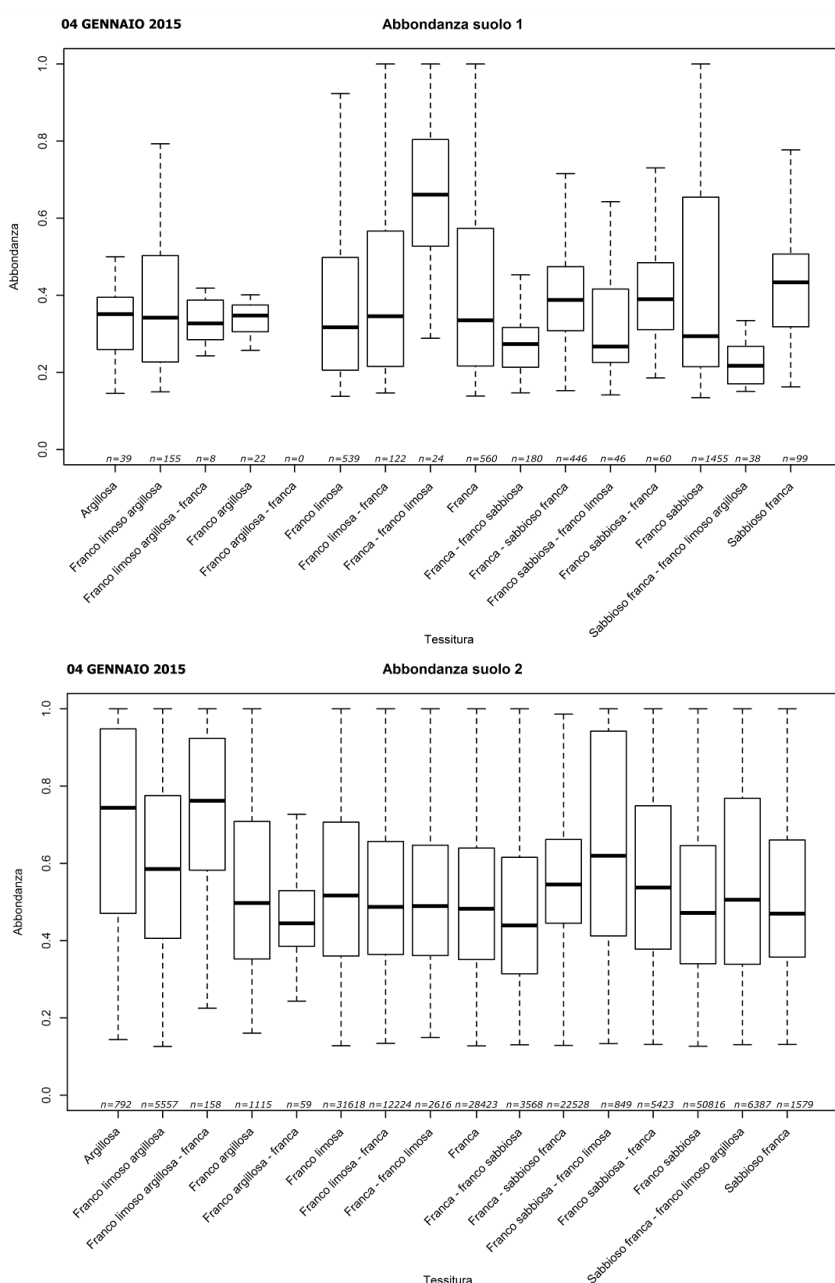


Figura 61. Box/Whiskers Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 (in alto) e delle abbondanze del suolo 2 (in basso), in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.

Analizzando i grafici Violin Plots (Figura 62; Appendice J e K), come nel caso dei box plot, il suolo 1 è caratterizzato prevalentemente dalle tessiture più grossolane, poiché le classi più fini tendono ad essere inferiori in termini di abbondanza (assenti in qualche caso). Nel suolo 2, le tessiture più fini come quella argillosa, franco argillosa, franco limoso argillosa e franco limoso argillosa-franca tendono ad essere più abbondanti e rappresentative.

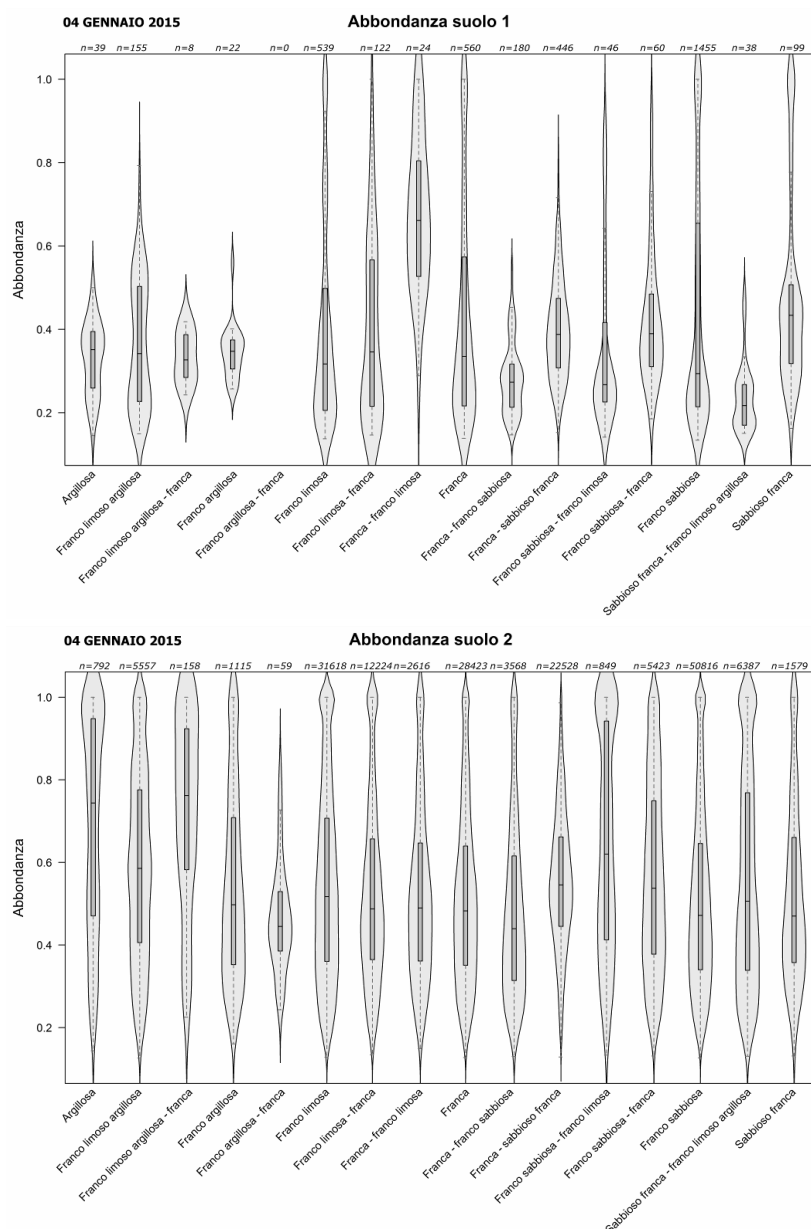


Figura 62. Violin Plots dell'acquisizione più rappresentativa (04 gennaio 2015): confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle abbondanze del suolo 1 (in alto) e delle abbondanze del suolo 2 (in basso), in relazione con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.

Anche nel caso delle classi tessiturali riscontrate dalla carta pedologica di semidettaglio 1:50.000, l'analisi statistica ha previsto lo studio delle riflettanze, per vedere se una banda sia caratteristica di una tessitura specifica (Figura 63; Appendice L ed M).

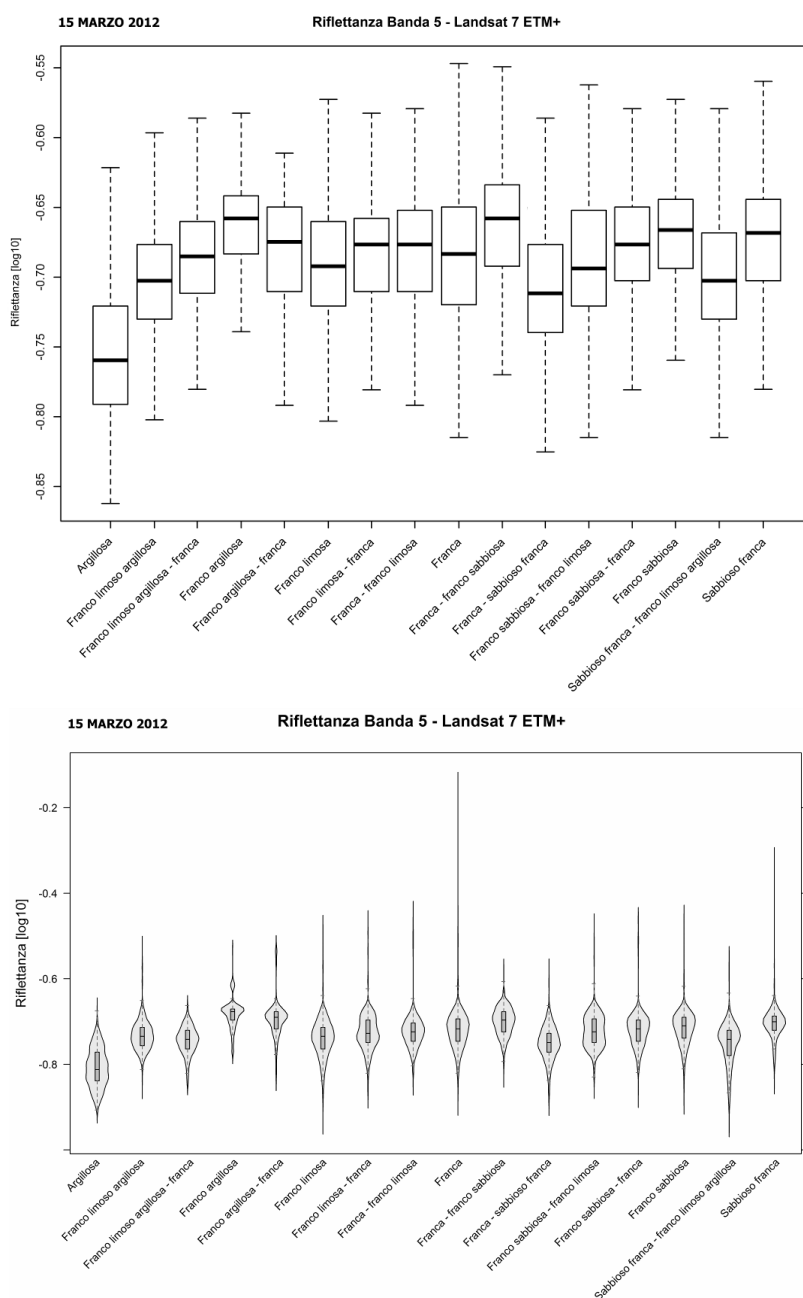


Figura 63. Box/Whiskers Plots (in alto) e Violin Plots (in basso) dell'acquisizione più rappresentativa, in questo caso del 12 marzo 2012: confronto dei grafici ottenuti dall'analisi delle riflettanze relate con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.

Le classi tessiturali costituite da materiale più fine presentano delle riflettanze meno intense, e ciò viene evidenziato anche dalla forma e dall'andamento del *Violin Plot*: le classi più grossolane hanno una distribuzione con la moda corrispondente a valori di riflettanza più elevati (forma “*a goccia*”), mentre le tessiture più fini tendono ad avere una distribuzione bimodale.

L'analisi statistica ha permesso di correlare le abbondanze di ogni tipologia di suolo nudo classificato da RM (suolo 1 e suolo 2), le riflettanze del dato ottico e le classi tessiturali ricavate dalle basi informative dei suoli. Relazionando le diverse tipologie di suolo identificate in funzione delle risposte radiometriche con le informazioni tessiturali è stato possibile constatare la relazione tra le abbondanza/riflettanze e le tessiture.

In accordo con Saxton et al. (1986), Stoner & Baumgardner (1981), Baumgardner et al. (1985), Mulders (1987), Irons et al. (1989), Coleman et al. (1991), Kasumov et al. (1992), Lillesand & Kiefer (1994), Saxton & Rawls (2006) e Croft et al. (2012), poiché i terreni costituiti da tessiture più fini hanno la tendenza a trattenere per più tempo l'acqua al proprio interno, presentano delle riflettanze meno intense a causa dell'assorbimento dell'energia irradiante da parte dell'umidità in essi contenuta (Stoner & Baumgardner, 1981; Baumgardner et al., 1985; Mulders, 1987; Irons et al., 1989; Coleman et al., 1991; Kasumov et al., 1992; Lillesand & Kiefer, 1994; Croft et al., 2012).

5.2. DISCUSSIONI

Il suolo, costituendo il primo ostacolo al movimento dei potenziali contaminanti verso le acque sotterranee (ERSAF, 2004), rappresenta uno degli elementi principali per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi (Meinardi et al., 1995). La capacità di attenuazione del suolo è una caratteristica ricavabile a partire da alcune proprietà fisico-chimiche del suolo, come la tessitura, il contenuto di sostanza organica e la densità apparente (De Maio et al., 2001; D'Haene et al., 2003; Calzolari et al., 2004; Calzolari & Ungaro, 2006; de Ruijter et al., 2007; Bottarin & Tappeiner, 2010). La tessitura dei suoli è il parametro che più di ogni altro influenza la lisciviazione dei nitrati verso l'acquifero (Oomen,

1995; Ryan, 1998; Sun & Kopp, 2013), poiché determina la permeabilità dei terreni e l'infiltrazione dei contaminanti (ERSAF, 2003).

I dati ottici multispettrali alla risoluzione geometrica di 30 x 30 m e risoluzione spettrale di 6 bande dal VIS-blue allo SWIR hanno permesso di caratterizzare la copertura del suolo, di determinarne la variazione nel tempo ed infine di individuare i suoli nudi e le relative tessiture. Per l'analisi multitemporale sono state utilizzate 5 immagini satellitari selezionate in un arco temporale considerato sufficiente per rendere visibile i cambiamenti nell'uso e nella copertura dei suoli. Nella prima parte dell'elaborazione si è evidenziato come differenti matrici ambientali siano caratterizzate da risposte spettrali dipendenti dalla loro natura fisica. I prodotti della classificazione delle coperture del suolo mostrano, nelle diverse acquisizioni, la variazione spaziale delle coperture nel tempo, in relazione ai cicli di semina delle colture e alla stagionalità.

In tutte le scene elaborate risulta facile constatare come la copertura associata all'acqua (fiumi e laghi) sia quella stabile nel tempo, con variazioni spaziali pressoché nulle.

Relativamente alle immagini del 2012, si evince un incremento della vegetazione con l'inizio del periodo primaverile e, di conseguenza, una diminuzione della copertura substrato (intesa come l'elemento fisico che racchiude rocce, sedimento, suolo e vegetazione non-fotosintetica). Poiché la coltura prevalente è il mais, il cui periodo di semina corrisponde con l'inizio della primavera, l'incremento di vegetazione nella scena del 25 aprile 2012 può essere associato alla crescita di tale cereale nell'area di studio.

Per quanto riguarda le immagini relative all'anno 2015, in corrispondenza della fine del mese di maggio, superata la prima metà della stagione primaverile, nelle aree agricole la vegetazione è in piena fase di crescita e, dal punto di vista quantitativo, la copertura intesa come substrato ricopre una superficie limitata. Anche nel mese di gennaio la vegetazione è molto rigogliosa, e questo può essere associato all'avvicendamento colturale che caratterizza tale periodo con la presenza di colture invernali, a seguito della raccolta di quelle primaverili-estive (mais). Quindi, la vegetazione è vigorosa nelle acquisizioni di gennaio e maggio,

mentre nel mese di aprile la componente principale risulta essere il substrato. Pertanto, al fine di effettuare la classificazione dei suoli nudi, è necessario analizzare le immagini satellitari corrispondenti ai periodi in cui i campi agricoli non sono coltivati (fase di riposo dei terreni e/o di semina colturale). Tale concetto viene sottolineato perché lo scopo è quello di avere delle mappe dei suoli il più rappresentative possibili. Affinché le colture non interferiscano con tale obiettivo, risultano maggiormente indicati i periodi primaverili prossimi alla semina (marzo e/o aprile). La scelta dell'intervallo temporale da analizzare si relaziona con la disponibilità del dato ottico satellitare, alle condizioni meteo-climatiche e alla copertura nuvolosa.

Analizzando la copertura del substrato, con lo scopo finale di realizzare delle mappe di suolo nudo, è stato possibile comprendere la relazione del segnale con le caratteristiche granulometriche/tessiture del terreno, essendo la riflettanza del suolo una proprietà cumulativa risultante dal comportamento spettrale intrinseco di combinazioni eterogenee di minerali, sostanza organica, acqua, struttura e tessitura (Baumgardner et al. 1985).

In generale, l'area coperta dal suolo 1 è molto ridotta rispetto alla superficie occupata dal suolo 2 per le osservazioni analizzate nel periodo invernale, mentre nel periodo primaverile si verifica un andamento opposto. Dalle mappe classificate dei suoli nudi si evince un trend contrario tra i risultati dell'anno 2012 e dell'anno 2015.

In dettaglio, nell'anno 2012 si verifica una diminuzione (in termini quantitativi) della classe di suolo 1, dal 15 marzo al 25 aprile: questa variazione è legata a fattori meteorologici/climatici ed in particolare, alle piogge che influiscono sulla intensità della firma spettrale e, quindi, sulla classificazione della classe di suolo. Come evidenziato dal bilancio idrico relativo (pioggia utile; Tabella 9), la scena del 25 aprile 2012 indica condizioni di surplus idrico legato alle precipitazioni, le quali comportano delle variazioni sull'intensità della firma spettrale a causa dell'assorbimento energetico da parte dell'acqua contenuta nei suoli (Baumgardner et al. 1985; Irons et al., 1989; Kasumov et al., 1992).

Le mappe dei suoli nudi relative all'anno 2015 mostrano, invece, da gennaio a maggio, una diminuzione di suolo 2 ed un aumento di suolo 1: tale variazione di tipologia di suolo nudo è legata a diversi fattori che comportano un cambiamento nella risposta spettrale dell'elemento fisico al suolo, come ad esempio la stagionalità nelle diverse acquisizioni, il contenuto organico, l'umidità e le proprietà fisiche del terreno, quali tessitura e struttura. Un'ulteriore causa potrebbe essere legata agli interventi meccanici al suolo realizzati al fine di creare condizioni favorevoli ad accogliere le colture (nel periodo di semina). Queste sono il principale mezzo con cui l'uomo può incidere sulle caratteristiche fisico-chimiche e biologiche del suolo in modo più o meno diretto, determinando variazioni della porosità e della struttura, quindi di umidità del suolo.

Risulta evidente come l'individuazione di aree non coltivate e a suolo nudo è resa più facile nei periodi di prevalente riposo dalle colture o di semina (periodo invernale o ad inizio primavera), mentre superata la prima metà della stagione primaverile i suoli nudi ricoprono una superficie molto limitata a causa della crescita delle colture.

Dalle statistiche riguardanti la distribuzione spaziale delle coperture, il numero dei pixel dei suoli nudi dell'anno 2012 risulta essere nettamente inferiore a quello delle immagini del 2015, a causa dell'effetto di striping delle scene L7 che comporta una perdita di informazioni. Poiché si vogliono ottenere dei risultati significativi in grado di descrivere la distribuzione spaziale dei suoli nudi di origine agricola, i prodotti delle elaborazioni delle immagini 2015 del satellite L8 risultano maggiormente indicate per la mappatura dei suoli, dato che non sono soggette all'effetto di striping.

La presente tesi vuole apportare un contributo alla definizione della tessitura dei suoli nudi, parametro utilizzato per calcolare la capacità protettiva dei suoli e per definire la vulnerabilità degli acquiferi in diversi modelli. Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi metodi che prevedono l'uso di modelli statistici in grado di ovviare il problema della soggettività dei metodi parametrici (Worrall & Besien, 2005; Masetti et al., 2007; Sorichetta et al., 2013; Stevenazzi et al., 2015). Quando sono disponibili sufficienti dati, metodi come la tecnica *Weights of Evidence*

(WofE) sono utilizzabili per la definizione della vulnerabilità (Masetti et al., 2007 e 2008; Sorichetta et al., 2013; Stevenazzi et al., 2015). Il WofE, recentemente sviluppato dall'Università di Milano, consente di correlare gli elementi che possono concorrere alla vulnerabilità delle acque sotterranee da nitrati con i dati dei monitoraggi delle acque medesime, ed è il metodo di riferimento per l'aggiornamento delle carte di vulnerabilità della Regione Lombardia (fonte: www.agricoltura.regione.lombardia.it). Questa metodologia è in grado di combinare diversi set di dati spaziali ed usarli per analizzare e descrivere le interazioni tra gli stessi e il fenomeno che si vuole indagare (Bonham-Carter, 1994; Raines et al., 2000). Uno dei fattori predittivi implementati nel modello è la capacità protettiva dei suoli (Masetti et al., 2007 e 2008), variabile categorica già distinta in un numero finito di classi, in funzione del grado di protezione nei confronti delle acque sotterranee (ERSAF, 2004). Pertanto, il suddetto modello utilizza un parametro categorico considerato statico nel tempo, con l'ultimo aggiornamento risalente all'anno 2004. Nel WofE, la capacità protettiva dei suoli è l'unico fattore non dotato di alcuna dinamicità, il quale potrebbe indurre un certo errore nella definizione della vulnerabilità degli acquiferi. Per la valutazione della capacità protettiva dei suoli nei confronti delle acque sotterranee, ERSAF (2004) ha sviluppato un modello interpretativo basato sulle principali caratteristiche dei suoli correlate con la loro capacità di controllare il trasporto di inquinanti verso la falda acquifera (permeabilità, tessitura, profondità della falda, pH e CSC). Poiché le caratteristiche dei suoli possono variare nel tempo, in relazione alla copertura e all'uso del suolo, la presente tesi vuole apportare una certa dinamicità alla tessitura, implicando, di conseguenza, una migliore definizione della capacità protettiva dei suoli. I prodotti delle mappe dei suoli nudi potrebbero contribuire alla definizione della capacità protettiva dei suoli variabile nel tempo, con possibilità di acquisire informazioni satellitari ogni due settimane. Per aumentare il dettaglio delle classificazioni ottenute dai dati telerilevati, risulta evidente la necessità di elaborare un numero maggiore di immagini per rafforzare le varie teorie e le correlazioni ipotizzate, arricchendo il dataset a disposizione così da diminuire l'eventuale errore statistico (ad es., deviazione standard) e

aumentare la significatività del dato. Il risultato potrebbe indurre ad un miglioramento nella definizione della capacità protettiva dei suoli, e quindi della vulnerabilità degli acquiferi. Per raggiungere un tale livello ottimale si ha la necessità di avere a disposizione una solida campagna radiometrica e di raccolta campioni da analizzare in laboratorio (in termini di caratteristiche fisico-chimiche), da far coincidere in precisi periodi dell'anno, in concomitanza con le lavorazioni del terreno, con particolari condizioni climatiche-atmosferiche, con la concimazioni dei suoli e con il passaggio del satellite.

Il pregio della procedura utilizzata in questa tesi è la possibilità di automatizzare il processo di elaborazione. Attualmente l'esecuzione della procedura richiede l'intervento dell'operatore nelle varie fasi, pertanto il livello di automatizzazione non è elevato ma, essendo ad un livello ancora di ricerca, è aperta a sviluppi futuri.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

La procedura implementata in questa tesi ha generato un insieme di prodotti dal valore aggiunto tramite l'utilizzo di tecniche pre-esistenti e ampiamente utilizzate in ambito scientifico, le quali hanno permesso di ampliare la conoscenza sul settore a partire dalle tradizionali osservazioni in situ (radiometria di campo). L'analisi dei dati ottici multispettrali è servita per definire l'abbondanza dei suoli nudi, basandosi sull'applicazione della tecnica LSMA (Linear Spectral Mixture Analysis), classificarli e associare ad essi la tessitura fornita dai dati ancillari sulla pedologia. Questa tipologia di dati permette di caratterizzare la copertura del suolo, di determinarne la variazione e infine di individuare, tenendo conto dei cicli di semina delle colture, i suoli nudi dei quali si intendeva caratterizzare la tessitura. Le cartografie dei suoli della Regione Lombardia hanno fornito la base informativa sulle diverse classi tessiturali presenti nell'area di studio, ognuna delle quali contiene la distribuzione spaziale e la caratterizzazione dei suoli nel territorio di riferimento. La raccolta delle firme spettrali di campo è stata utilizzata per la validazione dei dati di riflettanza delle risposte spettrali, permettendo di dare un'interpretazione ed un nome ai dati spettrali telerilevati.

Mediante un'apposita analisi statistica nella quale sono state integrate le informazioni pedologiche con i prodotti EO, si è cercato di trovare una correlazione tra le abbondanze (di ogni tipologia di suolo individuata), le riflettanze (ottenute dal dato ottico) e le classi tessiturali (derivate dalle carte pedologiche). Il valore aggiunto è la possibilità di osservare la variabilità nello spazio e nel tempo dei parametri che descrivono i suoli nudi, facendo attenzione all'ambiguità dei segnali spettrali nelle diverse acquisizioni satellitari. La variazione della classe di suolo nudo (suolo 1 e suolo 2) potrebbe essere dovuta principalmente alle caratteristiche fisiche dei suoli, quali tessitura, struttura, umidità e sostanza organica, oltre a ulteriori termini legati alla stagionalità, alla rugosità della superficie e alle caratteristiche tecniche di acquisizione del satellite (come l'angolo di vista del sensore).

La tessitura dei suoli nudi, proxy per la valutazione della capacità protettiva dei suoli, rappresenta il parametro che più influisce sulla permeabilità dei terreni di copertura e sull'infiltrazione dei contaminanti verso la falda acquifera (Bloemen, 1980; Schuh & Bauder, 1986; Wösten & Van Genuchten, 1988; Vereecken et al., 1990; ERSAF, 2003).

L'aggiornamento del tipo di suolo e delle caratteristiche e condizioni in cui esso si trova con una buona risoluzione temporale (ogni 2 settimane) potrebbe concorrere ad una diminuzione dell'errore statistico, aumentando la significatività del dato utile a definire la capacità protettiva dei suoli, quindi della vulnerabilità degli acquiferi.

In un prossimo futuro si auspica di poter utilizzare i dati della costellazione Sentinel-2 (European Space Agency - ESA), inserita nel Programma Copernicus (European Commission). La costellazione Sentinel-2, infatti, dispone di sensori che forniscono un dato con caratteristiche analoghe a quelle del Landsat, ma con una migliore risoluzione spaziale e temporale. Tale costellazione per il monitoraggio del territorio rappresenta una nuova opportunità per le analisi multi-temporali per un miglioramento nella mappatura delle coperture (Nutini et al., 2013), contribuendo significativamente a temi di monitoraggio e gestione nel settore agricolo, fornendo in modo regolare e tempestivo osservazioni affidabili (fonte: <http://www.attivitaproductive.regione.lombardia.it>).

La procedura realizzata per ricavare la mappa di tessitura del suolo nudo da immagini ottiche multispettrali è ad un livello ancora di ricerca ed aperta a sviluppi futuri.

BIBLIOGRAFIA

- AA. VV. (2005). Tecniche e metodi del telerilevamento. In: telerilevamento. Collana: "Diffusione e sperimentazione della cartografia, del telerilevamento e dei sistemi informativi geografici, come tecnologie didattiche applicate allo studio del territorio e dell'ambiente", vol. 3: 46-61. Disponibile sul sito web (verificato il 31 maggio 2016): <http://dipsa.unibo.it/catgis/teler2.html>.
- Adams, J.B., Smith, M.O., & Johnson, P.E. (1986). Spectral mixture modeling; a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. *Journal of Geophysical Research*, 91: 8098-8122.
- Adams, J. B., Smith, M. O., & Gillespie, A. R. (1993). Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. *Remote geochemical analysis: Elemental and mineralogical composition*, 7: 145-166.
- Adams, J.B., Sabol, D.E., Kapos, V., Almeida Filho, R., Roberts, D.A., Smith, M.O., & Gillespie, A.R. (1995). Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote sensing of Environment*, 52(2): 137-154.
- Alberti, L., De Amicis, M., Masetti, M., & Sterlacchini, S. (2001). Bayes' rule and GIS for evaluating sensitivity of groundwater to contamination. In 2001 Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, IAMG, pp. 6-12.
- Albuquerque, M.T.D., Sanz, G., Oliveira, S.F., Martínez-Alegría, R. & Antunes, I.M.H.R. (2013). Spatio-Temporal Groundwater Vulnerability Assessment – A Coupled Remote Sensing and GIS Approach for Historical Land Cover Reconstruction. *Water Resour Manage*, 27: 4509-4526, doi:10.1007/s11269-013-0422-0.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., & Bennett, T. (1987). Drastic: A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. USEPA document no. EPA/600/2-85-018.
- Amdur, M.O, Doull, J. & Klaassen, C.D. (1993). Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons, 4th Edition. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. Pergamon Press, New York, USA.
- Amorosi, A. (2008). Delineating aquifer geometry within a sequence stratigraphic framework: evidence from the quaternary of the Po River Basin, northern Italy. Amorosi A, Haq BU Sabato L (eds) *Advances in application of sequence stratigraphy in Italy*. *GeoActa Spec Publ*, (1): 1-14.
- Amorosi, A., & Farina, M. (1995). Large-scale architecture of a thrust-related alluvial complex from subsurface data: the Quaternary succession of the Po Basin in the Bologna area (northern Italy). *Giornale di geologia*, 57: 3-16.

- Amorosi, A., & Colalongo, M.L. (2005). The linkage between alluvial and coeval nearshore marine successions: evidence from the Late Quaternary record of the Po River Plain, Italy. *Fluvial Sedimentology*, VII: 255-275.
- Amorosi, A., Farina, M., Severi, P., Preti, D., Caporale, L., & Di Dio, G. (1996). Genetically related alluvial deposits across active fault zones: an example of alluvial fan-terrace correlation from the upper Quaternary of the southern Po Basin, Italy. *Sedimentary Geology*, 102(3): 275-295.
- Amorosi, A., Colalongo, M. L., Pasini, G., & Preti, D. (1999). Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46(1): 99-121.
- Amorosi, A., Pavese, M., Lucchi, M. R., Sarti, G., & Piccin, A. (2008). Climatic signature of cyclic fluvial architecture from the Quaternary of the central Po Plain, Italy. *Sedimentary Geology*, 209(1): 58-68.
- Anderson, J., Hardy, E., Roach, J., & Witmer, R. (2001). A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. A Revision of the Land Use Classification System as Presented in U.S. Geological Survey Professional Paper 964: Geological Survey circular, 671 pp.
- Anfossi, G., Desio, A., Gelati, R., Laureri, S., Petrucci, F., & Venzo, S. (1971). Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 60 Piacenza.
- APAT – Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (2008). Il suolo, la radice della vita. Roma, pp. 34-35, 58-63, 80-81. Disponibile sul sito web (verificato il 31 maggio 2016): <http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/pubblicazioni-di-pregio/il-suolo-la-radice-della-vita>.
- Ariati, L., Cotta Ramusino, S., & Peloso, G.F. (1988). La struttura del Colle di S.Colombano al Lambro: riflessi idrogeologici e caratteristiche chimiche della falda freatica. In: *Acque sotterranee di Lombardia: caratterizzazione chimica e inquinamento* (a cura di Casati P.), Coop. Edit. Nuova Brianza, pp. 97-114.
- ARPA Lombardia – Agenzia Regionale Protezione Ambientale (2002). Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia 2001, Parte IV: 1-15; Parte V: 92-97.
- ARPA Lombardia – Agenzia Regionale Protezione Ambientale (2007). Rapporto sullo stato dell'ambiente in Lombardia 2006, pp. 91-106.
- Arthur, J.D., Wood, H.A.R., Baker, A.E., Cichon, J.R., & Raines, G.L. (2007). Development and implementation of a Bayesian-based aquifer vulnerability assessment in Florida. *Natural Resources Research*, 16(2): 93-107, doi:10.1007/s11053-007-9038-5.
- Aschonitis, V.G., Mastrocicco, M., Colombani, N., Salemi, E., & Castaldelli, G. (2014). Assessment of the intrinsic vulnerability of agricultural land to water and nitrogen losses: case studies in Italy and Greece. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, Publ. 364: 14-19, doi:10.5194/piahs-364-14-2014.

- Assennato, F., Strollo, A., Di Leginio, M., Fumanti, F., & Munafò, M. (2015). I servizi ecosistemici del suolo – Un progetto di ricerca per limitare il consumo di suolo a scala locale. *Reticula*, 9: 16-21.
- Avanzini, R., Beretta, G. P., Francani, V., & Nespoli, R. (1995). Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella provincia di Milano. *Consorzio Acqua Potabile*, Milano.
- Baratti, C. (1999). I fontanili: una risorsa idrica ed ambientale. Tutela e gestione in Lomellina, Guerini e Associati, Milano.
- Barberis, R. (2005). Consumo di suolo e qualità dei suoli urbani. *Qualità dell'ambiente urbano*. II° Rapporto APAT, pp. 703-729.
- Barrocu, G., & Civita, M. (2004). Groundwater resources management in Italy. In: M.Brentwood and Robar S.F.(Eds.), "Managing common pool groundwater resources. A MultiNational perspective", pp. 111-121. ISBN: 0 -275-95737-3.
- Bartzas, G., Tinivella, F., Medini, L., Zaharaki, D., & Komnitsas, K. (2015). Assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area in north Italy. *Information Processing in Agriculture*, 2(2): 109-129, doi:10.1016/j.inpa.2015.06.004.
- Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Biehl, L.L., & Stoner, E.R. (1985). Reflectance properties of soils. *Adv. Agro*. 38: 1-44.
- Bello, M., & Fantoni, R. (2002). Deep oil plays in Po Valley: Deformation and hydrocarbon generation in a deformed foreland. In *Deformation history, fluid flow reconstruction and reservoir appraisal in foreland fold and thrust belts*: American Association of Petroleum Geologists, Hedberg Conference, pp. 1-4.
- Ben-Dor, E. (2002). Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75: 173-243.
- Beretta G.P. (1987). Primo contributo per la stesura di una carta idrogeologica della Lombardia. In: *Studi idrogeologici sulla Pianura Padana*, n. 3, Milano.
- Beretta, G.P., Pagotto, A., Vandini, R., & Zanni, S. (1991). Sovrasfruttamento degli acquiferi della pianura Padana: aspetti idrogeologici e idrochimici. *Rivista del catasto e dei Servizi Tecnici Erariali*, Nuova Serie-Anno XLIV, n.2, Roma.
- Bersezio, R., Pavia, F., Baio, M., Bini, A., Felletti, F., & Rodondi, C. (2004). Aquifer architecture of the Quaternary alluvial succession of the southern Lambro basin (Lombardy, Italy). *Il Quaternario*, 17(2/1): 361-378.
- Bertotti, G., Capozzi, R., & Picotti, V. (1997). Extension controls Quaternary tectonics, geomorphology and sedimentation of the N-Appennines foothills and adjacent Po Plain (Italy). *Tectonophysics*, 282(1), 291-301.

- Bigi, G., Cosentino, D., Parotto, M., Sartori, R., & Scandone, P. (1990). Structural model of Italy. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Progetto Finalizzato Geodinamica, Quaderni de "La Ricerca scientifica", 114/3, 1:500.000 scale, Firenze, SELCA.
- Bini, A. (1997). Stratigraphy, chronology and palaeogeography of Quaternary deposits of the area between the Ticino and Olona rivers (Italy-Switzerland). *Geologia Insubrica*, 2(2): 21-46.
- Bini, A., Strini, A., Violanti, D., & Zuccoli, L. (2004). Geologia di sottosuolo dell'alta pianura a NE di Milano. *Il Quaternario*, 17(2/1): 343-354.
- Bini, M., Kukavcic, M., & Pappalardo, M. (2012). Interpretazione di immagini satellitari della Pianura di Pisa. *MapPapers* 5(II): 212-222, doi:10.4456/MAPPA.2012.35.
- Bloemen, G.W. (1980). Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 143(5): 581-605.
- Blum, W.E.H. (1993). Soil protection concept of the Council of Europe and integrated soil research. In *Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection*, pp. 37-47.
- Blum, W.E.H., Büsing, J., & Montanarella, L. (2004). Research needs in support of the European thematic strategy for soil protection. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 23(10): 680-685, doi:10.1016/j.trac.2004.07.007.
- Boardman, J.W. (1989). Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition. *Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, pp. 2069-2072.
- Boardman, J. (1993). Automating spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. In Green, R. (a cura di), *Fourth airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) airborne geoscience workshop*, pp. 11-14.
- Boardman, J.W., & Kruse F.A. (1994). Automated spectral analysis: a geologic example using AVIRIS data, north Grapevine mountains, Nevada. In: *Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 1407-1418.
- Boccaletti, M., & Sani, F. (1998). Cover Thrust reactivations related to internal basement involvement during Neogene-Quaternary evolution of the Northern Apennines. *Tectonics*, 17(1): 112-130.
- Bottarin, R., & Tappeiner, U. (2010). Inquinamento idrico da nitrati di origine agricola individuazione di zone vulnerabili in Alto Adige. *Biologia Ambientale, Atti XVIII congresso S.It.E.*, 24 (1): 97-109.
- Bouma, J. (2001) The new role of soil science in a network society, *Soil Science*, 166(12): 874-879.

- Boyce, J.S., Muir, J., Edwards, A.P., Seim, E.C., & Olson, R.A. (1976). Geologic nitrogen in Pleistocene loess of Nebraska. *Journal of Environmental Quality*, 5(1): 93-96.
- Brady, N.C., & Weil, R.R. (2002). *The Nature and Properties of Soils*, 13th Edition. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 960 pp.
- Braga, G., & Ragni, U. (1969). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 44 Novara e Foglio 58 Mortara. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- Braga, G., & Cerro, A. (1988). Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorse idriche sotterranee. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31: 421-433.
- Brenna, S., & Rasio, R. (2000). Valutazione della funzione protettiva dei suoli a supporto delle decisioni nella Regione Lombardia. *Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo*, 48 (1-2): 247-252.
- Brenna, S., Rasio, R., & Riparbelli, C. (1999). La valutazione della capacità protettiva dei suoli nell'individuazione di aree vulnerabili alla percolazione dei prodotti fitosanitari: stato dell'arte in Lombardia. *Quaderni di Geologia Applicata*, Pubblicazione GNDICI-CNR n.2000, Pitagora Editrice, Bologna.
- Brivio, P.A., Tomasoni, R., & Zilioli, E. (1993). Il telerilevamento delle caratteristiche naturali e funzionali delle comunità acquatiche e terrestri, in *Ecologia Applicata* (a cura di R. Marchetti). Città Studi Edizioni, 434-466.
- Brivio, P.A., Lechi, G., & Zilioli, E. (2006). *Principi e metodi di telerilevamento*. Città Studi Edizioni, Novara, pp. 25, 34.
- Calzolari, C., & Ungaro, F. (2006). Capacità protettiva dei suoli nei confronti dell'inquinamento. In: Costantini, E.A.C. (Ed.), *Metodi di valutazione dei suoli e delle terre*. Collana di metodi analitici per l'agricoltura diretta da Paolo Sequi, 7: 2-22.
- Calzolari, C., Ungaro, F., Ragazzi, F., Vinci, I., Cappellin, R., & Venuti, L. (2004). Valutazione della capacità protettiva dei suoli nel bacino scolante in laguna di Venezia attraverso l'uso di modellistica. *Bollettino della Società Italiana di Scienza del Suolo*, 53: 415-421.
- Capri, E., Civita, M., Corniello, A., Cusimano, G., De Maio, M., Ducci, D., Fait, G., Fiorucci, A., Hauser, S., Pisciotta, A., Pranzini, G., Trevisan, M., Delgado Huertas, A., Ferrari, F., Frullini, R., Nisi, B., Offi, M., Vaselli, O. & Vassallo, M. (2009). Assessment of nitrate contamination risk: The Italian experience. *Journal of Geochemical Exploration*, 102: 71-86, doi:10.1016/j.gexplo.2009.02.006.
- Carbognin, L., & Tosi, L. (2003). Il progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle province di Padova e Venezia. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse e Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia, pp. 15-23.

- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N. & Smith, V.H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Society of America, Ecological Applications*, 8(3):559-568.
- Carter, A.D., Palmer, R.C., & Monkhouse, R.A. (1987). Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agricultural practice, particularly with respect to nitrate. *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, Proc Info*, 38: 333-342.
- Cassano, E., Anelli, L., Fichera, R., & Cappelli, V. (1986). Pianura Padana: interpretazione integrata di dati geofisici e geologici: 73° Congresso Società Geologica italiana.
- Castiglioni, G.B., & Pellegrini, G.B. (2001). Note illustrative della carta geomorfologica della Pianura Padana: Illustrative notes of the geomorphological map of Po Plain (Italy)/edited by GB Castiglioni, GB Pellegrini. Comitato glaciologico italiano.
- Cavallin, A., Francani, V., & Mazzarella, S. (1983). Studio idrogeologico della pianura compresa fra Adda e Ticino. *Costruzioni*, anno XXXII, n. 326 e 327, febbraio, Milano.
- Cavallin, A., Mazzarella, S., Orlando, M., & Spezzi Bottiani, G. (1984). Caratteri idrochimici delle acque sotterranee nella pianura milanese. *Acque sotterranee*, 2: 23-44.
- Chander, G., & Markham, B.L. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 41: 2674-2677.
- Chander, G., Markham, B. & Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sens. Environ.* 113: 893-903.
- Channell, J.E.T., D'Argenio, B., & Horvath, F. (1979). Adria, the African promontory, in *Mesozoic Mediterranean palaeogeography. Earth-Science Reviews*, 15(3): 213-292.
- Cierniewski, J. (1987). A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range. *Remote Sensing Environ.*, 23: 98-115.
- Cinnirella, S., Buttafuoco, G., & Pirrone, N. (2005). Stochastic analysis to assess the spatial distribution of groundwater nitrate concentrations in the Po catchment (Italy). *Environmental Pollution*, 133(3): 569-580, doi:10.1016/j.envpol.2004.06.020.
- Civita, M. (1987). La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità. *Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione"*, Mantova, pp. 9-18.

- Civita M. (1994). *Le Carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: Teoria & Pratica*. Quaderni di tecniche di protezione ambientale, Pitagora Editrice, Bologna, 325 pp.
- Civita, M. (2008). L'assetto idrogeologico del territorio italiano: risorse e problematiche. *Quaderni della Società Geologica Italiana*, 3: 1-34.
- Civita, M., & De Maio, M. (1997). SINTACS: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. *Metodologia e automatizzazione*.
- Civita, M., & De Maio, M. (2004). Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. *Geofísica internacional*, 43(4): 513-532.
- Clark R.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz A.N. (ed.) *Manual of remote sensing. Remote sensing for the Earth Science*, John Wiley and Sons, New York, 3: 3-58.
- Cleveland, W. (1993). *Visualizing Data*. AT & T Bell Laboratories, Murray Hill NJ.
- Cochrane, M.A. (1998). Linear mixture model classification of burned forests in the eastern Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 19(17): 3433-3440.
- Coleman, T.L., Agbu, P.A., Montgomery, O.L., Gao, T., & Prasad, S. (1991). Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Science*, 151(5): 355-361.
- Comizzoli, G., Gelati, R., Passeri, L.D., & Desio, A. (1969). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 45 Milano e Foglio 46 Treviso. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- Congedo, L., & Munafò, M. (2012). Development of a Methodology for Land Cover Classification in Dar es Salaam using Landsat Imagery. Tech. rep. Rome: Sapienza University, ACC Dar Project Sapienza University. Available at: <http://www.planning4adaptation.eu/> (confirmed on 30th May 2016).
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., & Lambin, E. (2004). Review Article Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International journal of remote sensing*, 25(9): 1565-1596.
- Costantini, E.A.C. (Ed.) (2007). *Linee guida dei metodi di rilevamento e informatizzazione dei dati pedologici*, CRA-ABP, Firenze, Italia, XV: 280 pp.
- Croft, H., Kuhn, N. J., & Anderson, K. (2012). On the use of remote sensing techniques for monitoring spatio-temporal soil organic carbon dynamics in agricultural systems. *Catena*, 94: 64-74.

- De Maio, M., Civita, M., Farina, M., & Zavatti, A. (2001). Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Manuali e linee guida 4/2001. ANPA - Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi, pp. 5-8, 67-68.
- Deering, D.W. (1989). Field measurements of bidirectional reflectance. In: Theory and Applications of optical remote sensing, ed. G. Asrar, Wiley, New York, 14-65.
- Dercourt, J.E.A., Zonenshain, L.P., Ricou, L.E., Kazmin, V.G., Le Pichon, X., Knipper, A.L., & Pechersky, D.H. (1986). Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics*, 123(1): 241-315.
- Desio, A. (1965). I rilievi isolati della Pianura Lombarda ed i movimenti tettonici del Quaternario, *Rend. Ist. Lom. Acc. Sc. Lett., Sez. A*, 99: 881-894.
- De Ruijter, F. J., Boumans, L. J. M., Smit, A. L., & Van den Berg, M. (2007). Nitrate in upper groundwater on farms under tillage as affected by fertilizer use, soil type and groundwater table. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 77(2): 155-167.
- D'haene, K., Moreels, E., De Neve, S., Daguilar, B. C., Boeckx, P., Hofman, G., & Van Cleemput, O. (2003). Soil properties influencing the denitrification potential of Flemish agricultural soils. *Biology and fertility of soils*, 38(6): 358-366.
- Di Gregorio, A., & Jansen, L.J. (1998). Land Cover Classification System (LCCS): classification concepts and user manual. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, Rome.
- Dixon, B. (2005). Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25(4): 327-347.
- Doerfliger, N., & Zwahlen, F. (1997). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: International symposium on Karst waters and environmental impacts, Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam, pp. 117-123.
- Dominati, E., Mackay, A., Patterson, M., & Gilkes, R.J. (2010). Modelling the provision of ecosystem services from soil natural capital. In Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. Congress Symposium 2: Soil ecosystem services, pp. 32-35.
- EC – European Commission (1991). Directive of the Council of 12th December 1991, concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC). *Official Journal L*. 375, 31.12.1991, pp. 1-8.
- Eckhardt, D.A., & Stackelberg, P.E. (1995). Relation of Ground-Water Quality to Land Use on Long Island, New York. *Ground Water*, 33(6): 1019-1033.
- EEA – European Environment Agency (2005). Nutrients in freshwater. Indicator Specification, Data and maps. Copenhagen, Denmark. Disponibile sul sito web: <http://eea.europa.eu> (verificato il 31 maggio 2016).

- Elmore, A.J., Mustard, J.F., Manning, S.J., & Lobell, D.B. (2000). Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote sensing of environment*, 73(1): 87-102.
- ERSAF – Ente Regionale per i Servizi all’Agricoltura e alle Foreste (2003). Base informativa Suolo a scala di semidettaglio, progetto Carta Pedologica versione 2.
- ERSAF – Ente di Ricerca per lo Sviluppo Agricolo e Forestale (2004). Strumenti ed indirizzi per la gestione multifunzionale dei suoli agricoli (SIGMA). Piano di Tutela delle Acque della regione Lombardia, Allegato 10 “Definizione delle zone vulnerabili da nitrati di origine agricola e da prodotti fitosanitari”, pp. 14-28.
- ERSAF – Ente Regionale per i Servizi all’Agricoltura e alle Foreste (2009). L’acqua, una risorsa per il sistema agricolo lombardo. Struttura Sviluppo rurale, Suoli e supporto alla Filiera Vitivinicola, Milano, pp. 11-18, 33-42, 65-71.
- ERSAF – Ente Regionale per i Servizi all’Agricoltura e alle Foreste (2015). Valutazione Ambientale Strategica. Programma d’azione regionale 2016-2019 per la tutela e risanamento delle acque dall’inquinamento causato da nitrati di origine agricola per le aziende localizzate in zona vulnerabile. Rapporto Ambientale, novembre 2015, pp. 70-138.
- Escadafal R. (1993) - Remote sensing of soil color: principles and applications, *Remote Sensing Reviews*. 7(3-4): 261-279.
- Fan, A.M., & Steinberg, V.E. (1996). Health implications of nitrate and nitrite in drinking water: an update on methemoglobinemia occurrence and reproductive and developmental toxicity. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 23(1): 35-43.
- FAO – Food And Agriculture Organization Of The United Nations (2006). Guidelines for soil description. Fourth edition. Rome, 2006.
- Finckh, P., Kelts, K., & Lambert, A. (1984). Seismic stratigraphy and bedrock forms in perialpine lakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(9): 1118-1128.
- Finke, P., Hartwich, R., Dudal, R., Ibanez, J., Jamagne, M., King, D., Montanarella, L., & Yassoglou, N. (2001). Georeferenced Soil Database for Europe-Manual of Procedures Version 1.1, European Soil Bureau, Scientific Committee, 184 pp.
- Fisher, P.F., Comber, A.J., & Wadsworth, R. (2005). Land use and Land cover: Contradiction or Complement. In: P.F. Fisher & D.J. Unwin, eds. *Representing GIS*. Chichester, England: John Wiley & Sons, 85-98.
- Focazio, M.J., Reilly, T.E., Rupert, M.G., & Helsel, D.R. (2002) Assessing ground-water vulnerability to contamination: providing scientifically defensible information for decision makers. Dept. of the Interior, United States Geological Survey, Circular 1224. Disponibile su: <http://pubs.usgs.gov/circ/2002/circ1224/> (verificato il 31 maggio 2016).

- Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proceedings and Information, TNO Committee on Hydrological Research, The Hague, 38: 69-86.
- Francani, V. (1997). *Idrogeologia generale e applicata*. Città Studi Edizioni, Milano.
- Francani, V., & Pozzi, R. (1981). Condizioni di alimentazione delle riserve idriche del territorio milanese. *Vie e Trasporti, La Rivista della strada*. Università degli Studi.
- Fumanti, F. (2009). Il suolo e le acque meteoriche. In: Focus su “Il suolo, il sottosuolo e la città”, V Rapporto ISPRA, “Qualità dell’ambiente urbano”, pp. 33.
- Galati, G., & Gilardini, A. (2000). Tecniche e strumenti per il telerilevamento ambientale. *Monografie scientifiche del CNR, I: 1-27*.
- Galloway, J.N., Townsend, A.R., Erismann, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., & Sutton, M.A. (2008). Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 320(5878): 889-892.
- Gardner, K.K., & Vogel, R.M. (2005). Predicting ground water nitrate concentration from land use. *Ground Water*, 43(3): 343-352.
- Gardi, C., Dall'Olio, N., Salata, S., & Mercalli, L. (2013). *L'insostenibile consumo di suolo*. EdicomEdizioni, Collana R.U.S.P.A. Ambiente e territorio, 136 pp.
- Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana (2006). Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152: Norme in materia ambientale. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 88 del 14 aprile del 2006 – Supplemento Ordinario n. 96. Allegato 7 - Parte AII “Aspetti metodologici”.
- Giuliano, G., Carone, G. & Corazza, A. (1999). Lo stato di contaminazione delle acque sotterranee utilizzate a scopo potabile in Italia. Istituto di Ricerca sulle acque, CNR, Quaderni, 99/111, 128 pp.
- Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39(6), 549-559.
- Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., & Hötzl, H. (2000). The PI method: a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Z Angew Geol*, 46(3), 157-166.
- Gomasca, M.A. (1998). *Introduzione a telerilevamento e GIS per la gestione delle risorse agricole e ambientali*. Associazione italiana di telerilevamento.
- Gomasca, M.A. (2004). *Elementi di Geomatica*. Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Gomasca, M.A. (2010). Basics of geomatics. *Applied Geomatics*, 2(3): 137-146.

- Goosens, M., & Van Damme, M. (1987). Vulnerability mapping in Flanders, Belgium. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO Committee on Hydrogeological Research, The Hague, Proc. and Information, (38): 355-360.
- Greene, E.A., LaMotte, A.E., & Cullinan, K.A. (2005). Ground-water vulnerability to nitrate contamination at multiple thresholds in the Mid-Atlantic Region using spatial probability models. US Department of the Interior, US Geological Survey, Scientific Investigations Report 2004-5118, pp. 24.
- Grignani, C., Zavattaro, L., Sacco, D., & Monaco, S. (2007). Production, nitrogen and carbon balance of maize-based forage systems. *European Journal of Agronomy*, 26(4): 442-453, doi:10.1016/j.agee.2011.06.014.
- Guffanti, S., Pilla, G., Sacchi, E., & Ughini, S. (2010). Caratterizzazione della qualità e origine delle acque sotterranee del Iodigiano mediante metodi idrochimici ed isotopici. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1: 65-78, doi:10.4408/IJEGE.2010-01.O-05.
- Hladik, C., Schalles, J., & Alber, M. (2013). Salt marsh elevation and habitat mapping using hyperspectral and LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 139: 318-330.
- Hörling, B., Haertlé, T., Hohberger, K. H., Nachtigall, K. H., Villinger, E., Weinzierl, W., & Wrobel, J. P. (1995). Concept for the determination of the protective effectiveness of the cover above the groundwater against pollution. Ad-hoc Working Group on Hydrology, Hannover, Germany, 5-24.
- Hosmer, D.W., & Lemeshow, S. (1989). *Applied Logistic Regression*. John Wiley and Sons, New York, NY, pp. 307.
- Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of educational psychology*, 24(6): 417.
- INEA – Istituto Nazionale di Economia Agraria (2009). Rapporto sullo stato dell'irrigazione in Lombardia. Programma Interregionale, Monitoraggio dei sistemi irrigui delle regioni centro settentrionali, pp. 1-60.
- Irons, J.R., Weismiller, R.A., & Petersen, G.W. (1989). Soil reflectance. Theory and applications of optical remote sensing, pp. 66-106.
- IRSA-CNR (1981). Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura Padana. Quaderni IRSA, 51(2): 1-70.
- ISPRA – Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale (2010). Rilievo di dettaglio della batimetria costiera laziale con tecnologie LiDAR e valutazione delle caratteristiche fisiche e biologiche in aree marine della costa laziale di specifico interesse ambientale. Fase 3 – Caratterizzazione ambientale. Technical report.
- ISPRA – Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale (2015). La contaminazione da nitrati nelle acque: applicazione di un modello isotopico nelle Regioni del Bacino del Po, della Pianura Veneta e del Friuli Venezia Giulia. Rapporti 217/2015.

- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2015b). Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 118 Milano (in press).
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2015c). Il consumo di suolo in Italia. Edizione 2015. Rapporti 218/2015, pp. 1-9.
- ISPRA – Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2015d). Suolo e territorio. In: *Annuario dei dati ambientali 2014-2015*. Stato dell'Ambiente, 60/2015.
- ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica (2012). Giornata mondiale dell'acqua. Le statistiche dell'Istat. 21 marzo 2012.
- ISTAT – Istituto Nazionale Statistica (2013). 6° Censimento Generale dell'Agricoltura. Atlante dell'agricoltura italiana. A cura di: Giampaola Bellini e Fabio Lipizzi con Fabrizio Consentino e Paola Giordano. ISBN: 978-88-458-1781-6.
- Jackson, R.D., Teillet, P.M., Slater, P.N., Fedosejevs, G., Jasinski, M.F., Aase, J.K., & Moran, M.S. (1990). Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. *Remote Sensing of Environment*, 32(2): 189-202.
- Jansen, L.J.M., & Di Gregorio, A. (2002). Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 91: 89-100.
- Johnson, P., Smith, M.O., Taylor-George, S., & Adams, J.B. (1983). A semiempirical method for analysis of the reflectance spectra for binary mineral mixtures. *Journal of Geophysical Research*, 88: 3557-3561.
- Jolliffe, I.T. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer-Verlag New York, Inc., Seconda edizione. ISBN 978-0-387-22440-4.
- Kasumov, O.K., Nabieva, T.A., & Tereshenkov O.M., (1992). Study of the spectral characteristics of soils of the Azerbaijan SSR. *Sov. Remote Sensing J.*, 9: 608-617.
- Klaassen, C.D. (2008). Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons, 7th Edition. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. Pergamon Press, New York, USA, pp. 136-140.
- Kolenbrander, G.J. (1981). Leaching of nitrogen in agriculture. In J.C. Brogan (Ed.), *Nitrogen Losses and Surface Run-off from Landspreading of Manures*, Martinus Nijhoff Publications, The Hague, pp. 199-216.
- Kumar, P., Bansod, B. K., Debnath, S. K., Thakur, P. K., & Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: A critical evaluation. *Environmental Impact Assessment Review*, 51: 38-49, doi:10.1016/j.eiar.2015.02.001.

- Kuroda, K., & Fukushi, T. (2008). Groundwater contamination in urban areas. In: Takizawa S. (eds), *Earth and Environmental Science. Groundwater management in Asian cities*, pp. 125-149, doi:10.1007/978-4-431-78399-2_7.
- Lambin, E.F., & Strahlers, A.H. (1994). Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 231-244.
- Lamigueiro, O.P., & Hijmans, R.J. (2014). rasterVis. R package version 0.31. doi:10.5281/zenodo.12394.
- LeGrand, H.E. (1964). System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. *Journal (American Water Works Association)*, 56(8): 959-974.
- LeGrand, H E. (1983). Standardized system for evaluating waste disposal sites; a manual to accompany description and rating charts. In *Standardized system for evaluating waste disposal sites; a manual to accompany description and rating charts*. National Water Well Association. Worthington, Ohio. 2a edizione. 49 pp.
- Leonardi, P. (1968). *Trattato di geologia*. Unione tipografico Editrice Torinese, Monografia cod.: LO10065445.
- Leone, A.P., Colombo, G., Palumbo, G., Torrent, J., & Barrón, V. (2003). Confronto tra misure spettrofotometriche e spettroradiometriche per la caratterizzazione degli ossidi-idrossidi di ferro in suoli delle Terre Rosse Pugliesi. *Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo*, 52(1-2): 637-647.
- Lesch, S.M. (2005). Sensor-directed spatial response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties. *Comput. Electron. Agric.* 46(1): 153-180.
- Lichtenberg, E., & Shapiro, L. (1997). Agriculture and nitrate concentrations in Maryland community water system wells. *Journal Environmental Quality*, 26 (1): 145-153.
- Lillesand, T., & Kiefer, R.W. (1994). *Remote sensing and image interpretation*. 2nd ed., Wiley New York.
- Lillesand, T., Kiefer, R.W., & Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Lo Curzio, S., & Russo, F. (2008). Evidenze di modificazioni geoambientali nell'area del Lago di Occhito (Italia meridionale) desunte dall'analisi multitemporale di immagini satellitari. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXVIII*: 145-152.
- Machado, R.P.P., & Small, C. (2013). Identifying multi-decadal changes of the Sao Paulo urban agglomeration with mixed remote sensing techniques: Spectral mixture analysis and night lights. *EARSel eProceedings*, 12(2): 101-112, doi:10.12760/01-2013-2-03.

- Malet, J.P., Auzet, A.V., Maquaire, O., Ambroise, B., Descroix, L., Esteves, M., & Truchet, E. (2003). Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the Super-Sauze earthflow (southern Alps, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(5): 547-564.
- Mantovani, F., & Marcolongo, B. (1992). *Fotogeologia: il telerilevamento nelle scienze della terra*. Nuova Italia scientifica, Roma, 221 pp.
- Manzo C., Valentini E., Taramelli A., Filipponi F., & Disperati L. (2015). Spectral characterization of coastal sediments using Field Spectral Libraries, Airborne Hyperspectral Images and Topographic LiDAR Data (FHyL). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 36: 54-68, doi:10.1016/j.jag.2014.11.003.
- Mariotti, G., & Doglioni, C. (2000). The dip of the foreland monocline in the Alps and Apennines. *Earth and Planetary Science Letters*, 181(1): 191-202.
- Martinis, B., & Mazzarella, S. (1971). *Prima ricerca idrica profonda nella Pianura Lombarda*. Mem. Ist. Geol. e Min. Univ. Padova, Vol. XXVIII, Padova.
- Mas, J.F. (1999). Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International journal of remote sensing*, 20(1): 139-152.
- Masetti, M. (2012). Vulnerabilità ai nitrati, metodologie a confronto. *Rivista di Arpa Emilia-Romagna. Sostenibilità e controllo ambientale, Ecoscienza* 6/2012, Anno III, pp. 78-80.
- Masetti, M., Poli, S., & Sterlacchini, S. (2007). The use of the weights-of-evidence modeling technique to estimate the vulnerability of groundwater to nitrate contamination. *Natural Resources Research*, 16(2): 109-119, doi:10.1007/s11053-007-9045-6.
- Masetti, M., Poli, S., Sterlacchini, S., Beretta, G.P., & Facchi, A. (2008). Spatial and statistical assessment of factors influencing nitrate contamination in groundwater. *Journal of environmental management*, 86(1): 272-281.
- Masetti, M., Sterlacchini, S., Ballabio, C., Sorichetta, A., & Poli, S. (2009). Influence of threshold value in the use of statistical methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of the total environment*, 407(12): 3836-3846, doi:10.1016/j.scitotenv.2009.01.055.
- Masetti, M., Nghiem, S.V., Sorichetta, A., Stevenazzi, S., Fabbri, P., Pola, M., Filippini, M. & Brakenridge, G.R. (2015). Urbanization affects air and water in Italy's Po Plain. *Eos*, 96. Published on 23 October 2015, doi:10.1029/2015EO037575.
- Mastrocicco, M., Colombani, N., Castaldelli, G., & Jovanovic, N. (2011). Monitoring and modeling nitrate persistence in a shallow aquifer. *Water, Air, & Soil Pollution*, 217(1-4): 83-93.

- Matiatos, I. (2016). Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece). *Science of The Total Environment*, 541: 802-814, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.09.134.
- McGill, R., Tukey, J.W., & Larsen, W.A. (1978). Variations of box plots. *The American Statistician*, 32(1): 12-16.
- Meinardi, C.R., Beusen, A.H.W., Bollen, M.J.S., Klepper, O., & Willems, W.J. (1995). Vulnerability to diffuse pollution and average nitrate contamination of European soils and groundwater. *Water Science and Technology*, 31(8): 159-165.
- Mering, C., & Chopin, F. (2002). Granulometric maps from high resolution satellite images. *Image Analysis & Stereology*, 21: 19-24.
- Milne, A.K. (1988). Change direction analysis using Landsat imagery: a review of methodology. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1988. IGARSS'88. Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century.*, International, 1: 541-544.
- Milton, E.J. (1999). Image endmembers and the scene model. *Canadian journal of remote sensing*, 25(2): 112-120.
- MIPAAF – Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (2009). Piano Strategico Nazionale Nitrati. SVIRIS III, Documento realizzato dalla Rete Rurale Nazionale nell'ambito della Task Force ambiente e condizionalità.
- Muchovej, R.M.C., & Rechcigl, J.E., 1995. Nitrogen fertilizer. In: Rechcigl, E. (Ed.), *Soil Amendments and Environmental Quality*. CRC Press, Boca Raton, pp. 1-48.
- Mueller, D.K., Ruddy, B.C., & Battaglin, W.A. (1997). Logistic model of nitrate in streams of the upper-midwestern United States. *Journal of Environmental Quality*, 26(5): 1223-1230.
- Mulders, M.A. (1987). *Remote Sensing in Soil Sciences. Developments in Soil Science*. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, vol. 15, 379 pp.
- Munafò, M., Norero, C., Sabbi, A., & Salvati, L. (2010). Soil Sealing in the Growing City: A Survey in Rome, Italy. *Scottish Geographical Journal*, 126(3): 153-161, doi:10.1080/14702541.2010.527855.
- Munafò, M., Salvucci, G., Zitti, M., & Salvati, L. (2010b). Proposta per una metodologia di stima dell'impermeabilizzazione del suolo in Italia. *Rivista di statistica ufficiale*, (2-3): 1828-1982.
- Muttoni, G., Carcano, C., Garzanti, E., Ghielmi, M., Piccin, A., Pini, R., & Sciunnach, D. (2003). Onset of major Pleistocene glaciations in the Alps. *Geology*, 31(11): 989-992.

- Navulur, K.C.S. (1996). Groundwater Vulnerability Evaluation to Nitrate Pollution on a Regional Scale Using GIS. Doctoral Dissertations & Theses. Purdue University, USA. Disponibile su: <http://docs.lib.purdue.edu/dissertations/AAI9725599/> (verificato il 31 maggio 2016).
- Nolan, B.T., Hitt, K.J. & Ruddy, B.C. (2002). Probability of Nitrate Contamination of Recently Recharged Groundwaters in the Conterminous United States. *Environmental Science and Technology*, 36: 2138-2145.
- Novák, J., Lukas, V., Křen, J., & Klimánek, M. (2013). Evaluation of bare soil variability from remote sensing data. In: *MendelNet 2013: Proceedings of International PhD Students Conference*, Mendel University in Brno, Czech Republic, 20-21 November 2013, pp. 114-119.
- Nutini, F., Boschetti, M., Brivio, P.A., Bocchi, S., & Antoninetti, M. (2013). Land-use and land-cover change detection in a semi-arid area of Niger using multi-temporal analysis of Landsat images. *International journal of remote sensing*, 34(13): 4769-4790, doi:10.1080/01431161.2013.781702.
- Onorati, G., Di Meo, T., Fabiani, C., Farrace, M.G., Fava, A., Ferronato, A., Mion, F., Marchetti, G., Martinelli, A., & Mazzoni, M. (2005). Groundwater Quality Monitoring in Italy for the Implementation of the EU Water Framework Directive. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 10022, 2005. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-10022. European Geosciences Union.
- Onorati, G., Di Meo, T., Bussettini, M., Fabiani, C., Farrace, M. G., Fava, A., & Mazzoni, M. (2006). Groundwater quality monitoring in Italy for the implementation of the EU water framework directive. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(17): 1004-1014.
- Oomen, G.J.M. (1995). Nitrogen cycling and nitrogen dynamics in ecological agriculture. *Biological Agriculture & Horticulture*, 11(1-4): 181-192, doi:10.1080/01448765.1995.9754704.
- Ori, G.G. (1993). Continental depositional systems of the Quaternary of the Po Plain (northern Italy). *Sediment, Geol.*, 83: 1-14.
- Orlov, D.S. (1966). Quantitative patterns of light reflection by soils. Influence of particle (aggregate) size on reflectivity. *Doklady Sov. Soil Sci.*, 13: 1495-1498.
- Orombelli, G. (1979). Il Ceppo d'Adda: revisione stratigrafica. *Riv. It. Paleont. Strat.*, Vol. 85, Milano.
- Padovani, L., & Trevisan, M. (2002). I nitrati di origine agricola nelle acque sotterranee. Un indice parametrico per l'individuazione di aree vulnerabili. *Quaderni di tecniche di protezione ambientale*. Pubblicazione GNDICI-CNR n. 2478. Pitagora Editrice, Bologna. ISBN 88-371-1260-2, 75: 103 pp.
- Pearson, K. (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11): 559-572.

- Penndorf, R. (1956). Luminous and spectral reflectance as well as colors of natural objects. U.S. Air Force Cambridge Research Center, Bedford, Massachusetts.
- Perego, A., Basile, A., Bonfante, A., De Mascellis, R., Terribile, F., Brenna, S., & Acutis, M. (2012). Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 147: 57-65.
- Pieri, M., & Groppi, G. (1981). Subsurface geological structure of the Po Plain. Progetto Finalizzato Geodinamica/Sottoprogetto "Modello Strutturale", Publ. Italian CNR, 414: 1-13.
- Rawls, W.J., & Brakensiek, D.L. (1989). Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Unsaturated flow in hydrological modeling. Theory and Practice*, pp. 275-300.
- Regione Lombardia (2006). Programma di tutela e uso delle acque. Relazione di sintesi. U.O. Regolazione del Mercato e Programmazione, Marzo 2006.
- Regione Lombardia (2012). Tutela e valorizzazione dei fontanili del territorio lombardo (FonTe). Quaderni della Ricerca n. 144 - marzo 2012, pp. 11-22.
- Regione Lombardia (2013). Sistema Informativo Territoriale (SIT), Gestione Polo Centrale. Basi informative dei suoli, aggiornamento Luglio 2013.
- Regione Lombardia & ENI-AGIP (2002). Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia. CARCANO C. & PICCIN A. (Eds.), S.EL.CA., Firenze.
- Regione Lombardia & ERSAF (2010a). Uso del suolo in Regione Lombardia. I dati Dusaf, Edizione 2010. Disponibile su <http://www.territorio.regione.lombardia.it/>.
- Regione Lombardia & ERSAF (2010b). Uso del suolo in Regione Lombardia. Atlante descrittivo. Disponibile su <http://www.territorio.regione.lombardia.it/> (verificato il 31 maggio 2016).
- Ricci Lucchi, F. (1986). The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines. *Foreland Basins, Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 8: 105-139.
- Ricci Lucchi, F., Colalongo, M. L., Cremonini, G., Gasperi, G., Iaccarino, S., Papani, G., & Rio, D. (1982). Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico. Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Soc. Geol. It, pp. 17-46.
- Ricci Lucchi, F., Bassetti, M. A., Manzi, V., & Roveri, M. (2002). Il Messiniano trent'anni dopo: eventi connessi alla crisi di salinità nell'avanfossa appenninica. *Studi Geologici Camerti nuova serie*, 1: 127-142.
- Richards, J.A., & Jia, X. (2006). The Interpretation of Digital Image Data. In: *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Berlin, Germany: Springer, pp. 67-82, doi: 10.1007/3-540-29711-1_3.

- Rivett, M.O., Buss, S.R., Morgan, P., Smith, J.W., & Bemment, C.D. (2008). Nitrate attenuation in groundwater: a review of biogeochemical controlling processes. *Water research*, 42(16): 4215-4232.
- Roberts, D.A., Gardner, M., Church, R., Ustin, S., Scheer, G., & Green, R.O. (1998). Mapping chapparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models, *Remote Sensing of Environment*, 65: 267-279.
- Ryan, M. (1998). Water movement in a structured soil in the south-east of Ireland: preliminary evidence for preferential flow. *Irish Geography*, 31(2): 124-137, doi:10.1080/00750779809478624.
- Sandstedt, C.A. (1990). Nitrate: sources and their effects upon humans and livestock. American University, Washington D.C., USA.
- Sartori, F. (2001). Per una cartografia tematica lombarda. Telerilevamento. Metodologia di raccolta, elaborazione e rappresentazione di dati ambientali territoriali. Fondazione lombarda per l'Ambiente/Università degli Studi di Pavia, pp. 380-404.
- Saxton, K.E., & Rawls, W.J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5): 1569-1578.
- Saxton, K. E., Rawls, W., Romberger, J. S., & Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4): 1031-1036.
- Scardia, G., Muttoni, G., & Sciunnach, D. (2006). Subsurface magnetostratigraphy of Pleistocene sediments from the Po Plain (Italy): Constraints on rates of sedimentation and rock uplift. *Geological Society of America Bulletin*, 118(11-12): 1299-1312.
- Schuh, W.M., & Bauder, J.W. (1986). Effect of soil properties on hydraulic conductivity-moisture relationships. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4): 848-855.
- Self, J. R., & Waskom, R. M. (2013). Nitrates in drinking water: fact sheet no. 0.517, Colorado State University Extension.
- Sener, E., & Davraz, A. (2013). Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, 21(3), 701-714.
- Sequi, P. 1989. *Fondamenti di Chimica del Suolo*, Patron Editore, Bologna.
- Settle, J.J., & Drake, N.A. (1993). Linear mixing and the estimation of ground cover proportions. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6): 1159-1177.
- Silvan-Cardenas, J. L., & Wang, L. (2010). Fully constrained linear spectral unmixing: Analytic solution using fuzzy sets. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 48(11): 3992-4002.

- Soil Survey Staff (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, USDA Handbook 18.
- Soil Survey Staff (2006). Keys to Soil Taxonomy (Tenth Edition), USDA, Natural Resources Conservation Service, Washington D.C., USA.
- Sorichetta, A. (2010). Groundwater vulnerability assessment using statistical methods. Ph.D. Thesis, Università degli Studi di Milano. Disponibile su: https://air.unimi.it/bitstream/2434/152913/4/phd_unimi_R07615.pdf (verificato il 31 maggio 2016).
- Sorichetta, A., Masetti, M., Ballabio, C., Sterlacchini, S., & Beretta, G.P. (2011). Reliability of groundwater vulnerability maps obtained through statistical methods. *Journal of environmental management*, 92(4): 1215-1224.
- Sorichetta, A., Ballabio, C., Masetti, M., Robinson, G. R., & Sterlacchini, S. (2013). A Comparison of Data-Driven Groundwater Vulnerability Assessment Methods. *Groundwater*, 51(6): 866-879.
- Small, C. (2001). Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *International journal of remote sensing*, 22(7): 1305-1334.
- Small, C. (2004). The Landsat ETM+ spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 93:1-17.
- Small, C. (2005). A global analysis of urban reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 661-681.
- Small, C., & Lu, J.W. (2006). Estimation and vicarious validation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis. *Remote Sensing of Environment*, 100 (4): 441-456.
- Small, C., & Milesi, C. (2013). Multi-scale standardized spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 136: 442-454.
- Smith, M.O., Johnson, P., & Adams, J.B. (1985). Quantitative determination of mineral types and abundances from reflectance spectra using principal component analysis. *Journal of Geophysical Research*, 90: 792-804.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B., & Gillespie, A.R. (1990). Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote sensing of Environment*, 31(1): 1-26.
- Stempvoort, D.V., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index (AVI): a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1): 25-37, doi:10.4296/cwrj1801025.
- Stevenazzi, S., Masetti, M., Nghiem, S. V., & Sorichetta, A. (2015). Groundwater vulnerability maps derived from a time-dependent method using satellite scatterometer data. *Hydrogeology Journal*, 23(4): 631-647, doi:10.1007/s10040-015-1236-3.

- Stoner, E., & Baumgardner, M.F. (1981). Characteristics variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 1161 -1165.
- Storey, J. C., Scaramuzza, P., & Schmidt, G. (2005). Landsat 7 scan line corrector-off gap filled product development. *PECORA 16 Conference Proceedings*, Sioux Falls, South Dakota, pp. 23-27.
- Sun, H., & Kopp, K.L. (2013). Identifying high-risk areas of N leaching in the Salt Lake Valley. *International Turfgrass Society Research Journal*, CWEL Publications, Paper 81, 12: 39-46.
- Taramelli, A., & Meelli, L. (2009). Map of deep seated gravitational slope deformation susceptibility in central Italy derived from SRTM DEM and spectral mixing analysis of the Landsat ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 30: 357-387.
- Taramelli, A., Giardino, C., Gasperini, L., del Bianco, F., Bresciani, M., Valentini, E., & Disperati, L. (2010). Biophysical and morphological study of coastal habitats from imaging spectrometry, LIDAR and in situ data acquisition. In: Extended abstract, The hyperspectral workshop 2010, ESRIN 17-19 Marzo 2010, Frascati (ESA SP-683, May 2010).
- Taramelli, A., Pasqui, M., Barbour, J., Kirschbaum, D., Bottai, L., Busillo, C., & Small, C. (2013). Spatial and temporal dust source variability in northern China identified using advanced remote sensing analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8): 793-809.
- Taramelli, A., Valentini, E., Innocenti, C., & Cappucci, S. (2013b). FHYL: Field spectral libraries, airborne hyperspectral images and topographic and bathymetric LiDAR data for complex coastal mapping. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE International, 21-26 July 2013, Melbourne, pp. 2270-2273, doi:10.1109/IGARSS.2013.6723270.
- Taramelli, A., Valentini, E., Cornacchia, L., Mandrone, S., Monbaliu, J., Hoggart, S.P.G., & Zanuttigh, B. (2014). Modeling uncertainty in estuarine system by means of combined approach of optical and radar remote sensing. *Coastal Engineering*, 87: 77-96, doi:10.1016/j.coastaleng.2013.11.001.
- Tesoriero, A.J., & Voss, F.D. (1997). Predicting the probability of elevated nitrate concentrations in the Puget Sound Basin: implications for aquifer susceptibility and vulnerability. *Ground Water*, 35(6): 1029-1039.
- Thompson, M. (1996). A standard land-cover classification scheme for remote-sensing applications in South Africa. *South African Journal of Science*, 92(1): 34-42.
- Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1): 55-94.
- Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology*, 10(3): 183-243.

- URBIM – Unione Regionale Bonifiche Irrigazioni e Miglioramenti fondiari Lombardia (2003). Atlante della bonifica e dell'irrigazione. Progetto S.I.B.I.Te.R. (Sistema Informatico della Bonifica Irrigazione e Territorio Rurale), la Direzione Generale Agricoltura, Mantova.
- USGS – Unites States Geological Survey (2007). Landsat 7 Science Data Users Handbook, NASA, Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland.
- USGS – United States Geological Survey (2015). Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, Version 1.0. June 2015. Sioux Falls, South Dakota.
- Valentini, E., Taramelli, A., Filipponi, F., & Giulio, S. (2015). An effective procedure for EUNIS and Natura 2000 habitat type mapping in estuarine ecosystems integrating ecological knowledge and remote sensing analysis. *Ocean & Coastal Management*, 108: 52-64.
- Van de Voorde, T., Vlaeminck, J., & Canters, F. (2008). Comparing different approaches for mapping urban vegetation cover from Landsat ETM+ data: a case study on Brussels. *Sensors*, 8(6): 3880-3902.
- Vereecken, H., Maes, J., & Feyen, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 149(1): 1-12.
- Vitousek, P., Mooney, H., Olander, L. & Allison., S. (2002). Nitrogen and nature. *Ambio* 31:97-101.
- Vittori, E., & Ventura, G. (1995). Grain size of fluvial deposits and late Quaternary climate: A case study in the Po River valley (Italy). *Geology*, 23(8): 735-738.
- Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, no. 16. Verlag Heinz Heise, Hannover.
- Wang, B., Strelakos, P. M., & Jokela, B. (2000). Nitrate source indicators in ground water of the Scimitar Subdivision, Peters Creek area, Anchorage, Alaska. US Department of the Interior, US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4137.
- Weisenburger, D.D. (1990). Environmental epidemiology of non-Hodgkin's lymphoma in eastern Nebraska. *American journal of industrial medicine*, 18(3): 303-305.
- Welch, A.H., Westjohn, D.B., Helsel, D.R., & Wanty, R.B. (2000). Arsenic in ground water of the United States: occurrence and geochemistry. *Ground water*, 38(4): 589-604.
- Weyer, P.J., Cerhan, J.R., Kross, B.C., Hallberg, G.R., Kantamneni, J., Breuer, G., & Lynch, C.F. (2001). Municipal drinking water nitrate level and cancer risk in older women: the Iowa Women's Health Study. *Epidemiology*, 12(3): 327-338.

- WHO – World Health Organization (2011). Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, pp. 1-3.
- Wick, K., Heumesser, C., & Schmid, E. (2010). Nitrate contamination of groundwater in Austria: Determinants and Indicators. Diskussionspapier DP-49-2010, Institut für nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Juli 2010.
- Worral, F., & Besien, T. (2005). The vulnerability of groundwater to pesticide contamination estimated directly from observations of presence or absence in wells. *Journal of Hydrology*, 303(1): 92-107.
- Wösten, J.H.M., & Van Genuchten, M.T. (1988). Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of America Journal*, 52(6): 1762-1770.
- Zilioli, E., Brivio, P.A., & Lechi, G.M. (Eds.). (1992). *Il telerilevamento da aereo e da satellite*. Carlo Delfino Editore. Sassari.
- Zuppi, G.M., & Sacchi, E. (2004). Hydrogeology as a climate recorder: Sahara–Sahel (North Africa) and the Po Plain (Northern Italy). *Global and Planetary Change*, 40(1): 79-91.

SITOGRAFIA

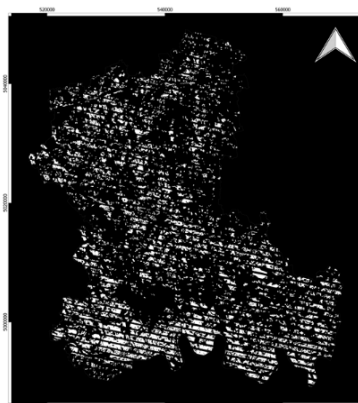
- ARPA Lombardia. Servizio Meteorologico regionale. Sito web: <http://ita.arpalombardia.it>. Consultato il 08/01/2016.
- Autorità di bacino del fiume Po. Sito web: <http://www.adbpo.it>. Consultato il 02 ottobre 2015.
- GeologiaOnLine. EvapoOnline Ver.1.1. Calcolo evapotraspirazione secondo Thornthwaite. Sito web: <http://www.fmulas.net/geologia/evapo/>. Consultato il 10 febbraio 2016.
- ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica. Agricoltura e Zootecnica. Sito web: <http://agri.istat.it/>. Consultato il 15/01/2016.
- ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica. Censimento Popolazione Abitazioni. Sito web: <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/>. Consultato il 15 dicembre 2015.
- Regione Lombardia. Geoportale Cartografico. Infrastruttura Informazione Territoriale. Sito web: <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>. Consultato il 20 settembre 2015.
- Regione Lombardia. Direzione Generale. Agricoltura. Sito web: http://www.agricoltura.regione.lombardia.it/cs/Satellite?c=Redazionale_P&childpagename=DG_Agricoltura%2FDetail&cid=1213688954518&packedargs=NoSlotForSitePlan%3Dtrue&pagename=DG_AGRWrapper. Consultato il 30 maggio 2016.
- Regione Lombardia. Direzione Generale. Territorio, Urbanistica e Difesa del Suolo. Rete Stradale. Sito web: <https://www.dati.lombardia.it/Territorio/Rete-Stradale/nyxe-8s3y>. Consultato il 06 ottobre 2015.
- Regione Lombardia. Direzione Generale. Territorio, Urbanistica e Difesa del Suolo. Riordino dei consorzi di bonifica. Sito web: <http://www.territorio.regione.lombardia.it/shared/ccurl/924/819/allegato1,2.pdf>. Consultato il 31 maggio 2016.
- Regione Lombardia. Direzione Generale. Università, ricerca e open innovation. Sito web: http://www.attivitaproductive.regione.lombardia.it/cs/Satellite?c=Evento&cid=1213748566628&childpagename=DG_Industria%2FDetail&pagename=DG_INDWrapper. Consultato il 15 giugno 2016.
- Regione Lombardia. Uso del suolo in Regione Lombardia: i dati DUSAF. Sito web: <http://www.territorio.regione.lombardia.it/>. Consultato il 15 ottobre 2015.
- USGS – Unites States Geological Survey. Earth Explorer Distribution Download. Sito web: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Consultato il 02/06/2015.
- USGS – Unites States Geological Survey. Landsat Missions. Sito web: <http://landsat.usgs.gov/>. Consultato il 02 giugno 2015.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questa esperienza, desidero ringraziare tutti coloro che in vari modi hanno contribuito alla mia crescita scientifica, al raggiungimento dell'obiettivo e alla realizzazione dell'elaborato, prestando il loro aiuto e la loro preziosa assistenza. Porgo i più sentiti ringraziamenti al mio correlatore, il Prof. Andrea Taramelli per avermi offerto l'opportunità di entrare a far parte di un gruppo di lavoro all'interno del Progetto SEGUICI, grazie al quale ho rafforzato le mie conoscenze sul mondo della ricerca e sulle applicazioni del telerilevamento. Ringrazio poi il mio relatore, Prof. Leonardo Piccinini per i suoi suggerimenti e per avermi seguito con attenzione e competenza durante la stesura della tesi, dimostrandosi sempre disponibile ed offrendomi degli insegnamenti e dei consigli importanti per il mio percorso formativo. Ringrazio l'ISPRA per l'accoglienza offertami durante il lavoro svolto nei loro uffici in questi cinque mesi di permanenza a Roma. Una gratitudine particolare va alla Dott.ssa Emiliana Valentini per la professionalità dimostrata e per aver condiviso tutto il necessario tecnico e scientifico utile alla realizzazione di questa tesi. Ringrazio il Dott. Federico Filipponi per il supporto datomi durante l'uso dei diversi software. Altri sentiti ringraziamenti sono rivolti alla Dott.ssa Serena Geraldini, Dott.ssa Alessandra Nguyen Xuan, Dott.ssa Antonella Tornato e Dott.ssa Marianna Bonfanti, dalle quali ho sempre ricevuto preziosi consigli. Un grazie va anche al Dott. Marco D'Antona per le delucidazioni in materia di nitrati. Ringrazio il Dott. Fabrizio Galluzzo, per i dati geologici forniti in via straordinaria. Sentiti ringraziamenti alla Dott.ssa Chiara D'ambrogi e alla Dott.ssa Roberta Carta per la trasmissione delle carte geologiche richieste. Una grande riconoscenza va naturalmente alla mia famiglia, poiché grazie a loro ho continuato questa carriera di studi, rendendo possibile il raggiungimento di questo secondo traguardo universitario, supportandomi moralmente, oltre che economicamente. Vorrei ringraziare Alice per avermi incoraggiato in questi ultimi mesi, in un periodo così particolare. Ringrazio tutti gli amici che mi hanno confortato, amici vicini e lontani, con cui ho vissuto emozioni, momenti ed esperienze uniche.

APPENDICE

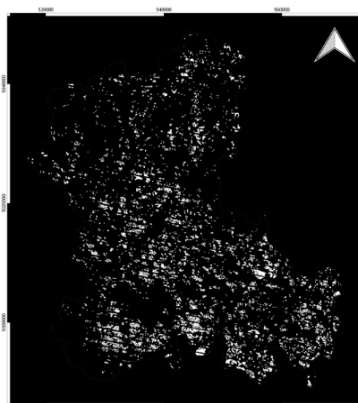
Appendice A – Maschere dei suoli nudi utilizzate per ottenere le mappe di copertura dei suoli nudi nelle varie acquisizioni.



Legenda
□ Area di studio
Maschera dei suoli:
● suoli nudi

15 MARZO 2012

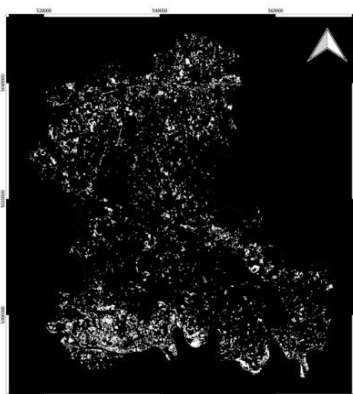
0 5 10 15 km
1:250.000
UTM WGS-84
Fuso 32N



Legenda
□ Area di studio
Maschera dei suoli:
● suolo nudo

25 APRILE 2012

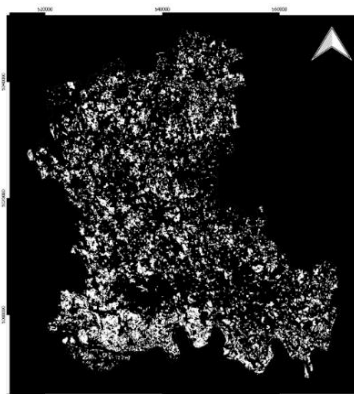
0 5 10 15 km
1:250.000
UTM WGS-84
Fuso 32N



Legenda
□ Area di studio
Maschera dei suoli:
● suolo nudo

04 GENNAIO 2015

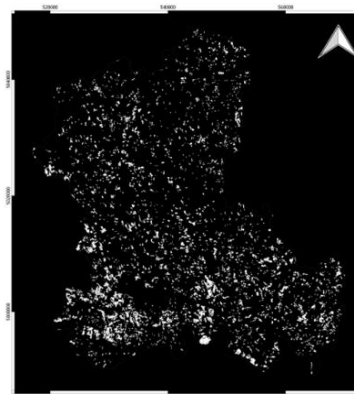
0 5 10 15 km
1:250.000
UTM WGS-84
Fuso 32N



Legenda
□ Area di studio
Maschera dei suoli:
● suolo nudo

01 APRILE 2015

0 5 10 15 km
1:250.000
UTM WGS-84
Fuso 32N

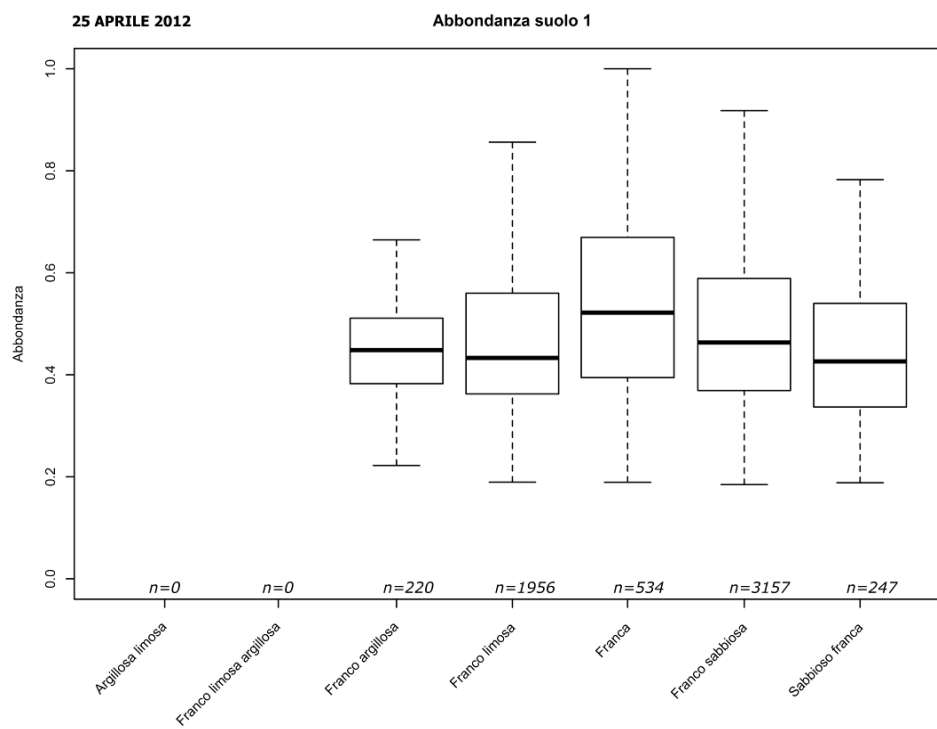
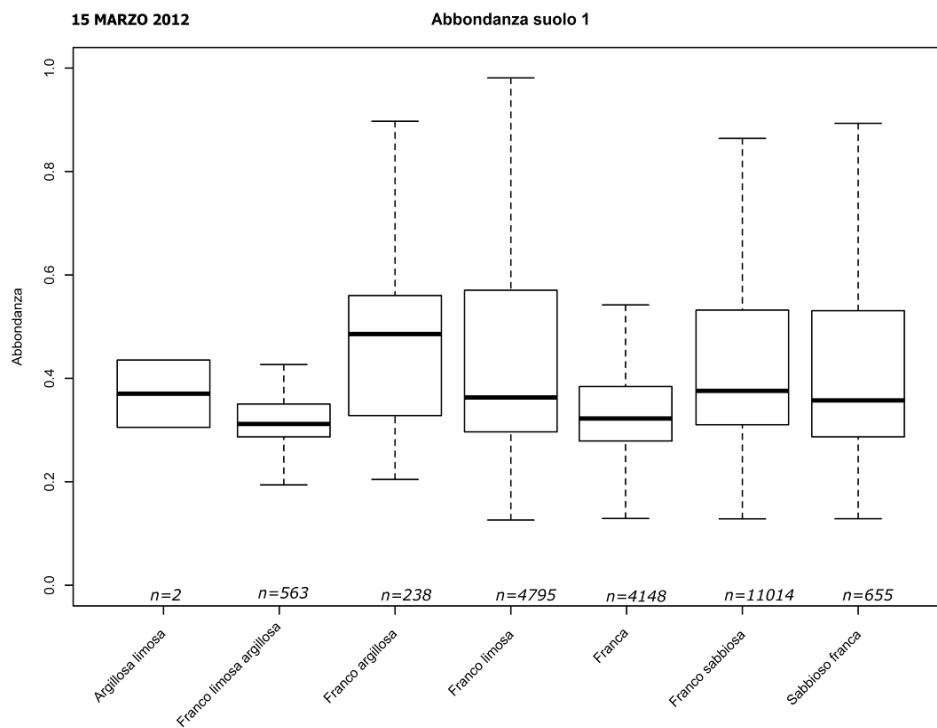


Legenda
□ Area di studio
Maschera dei suoli:
● suolo nudo

28 MAGGIO 2015

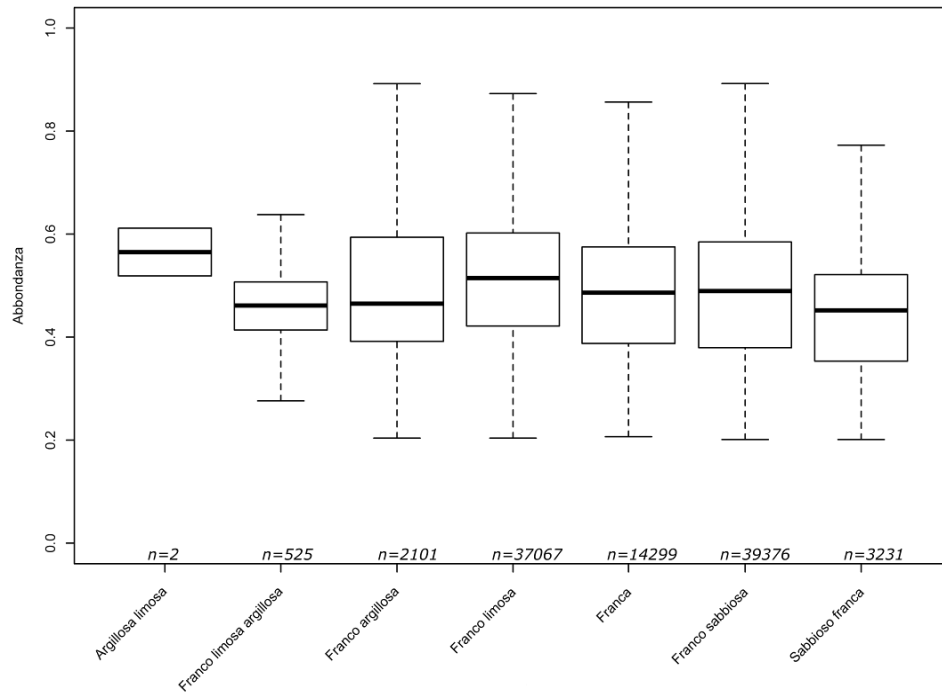
0 5 10 15 km
1:250.000
UTM WGS-84
Fuso 32N

Appendice B – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 1, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:250.000.

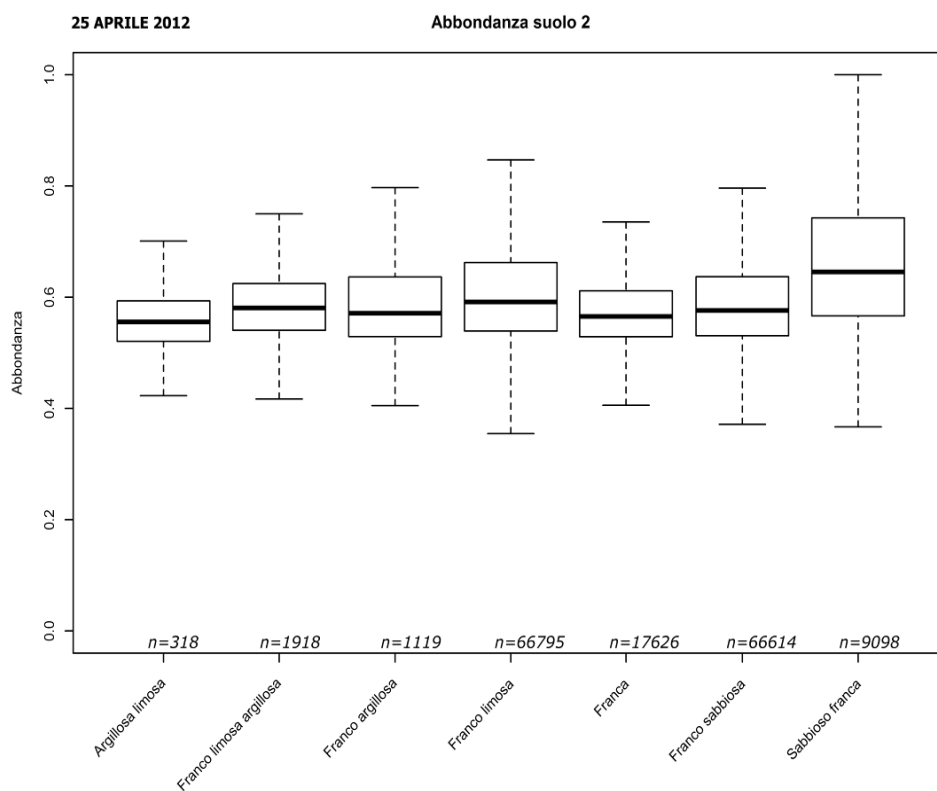
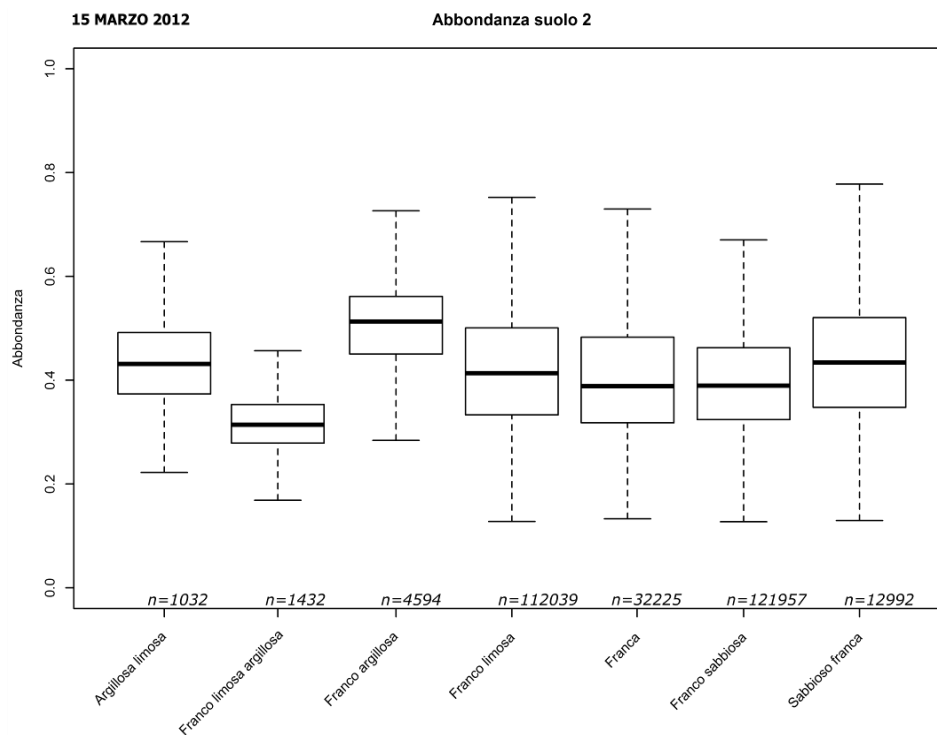


01 APRILE 2015

Abbondanza suolo 1

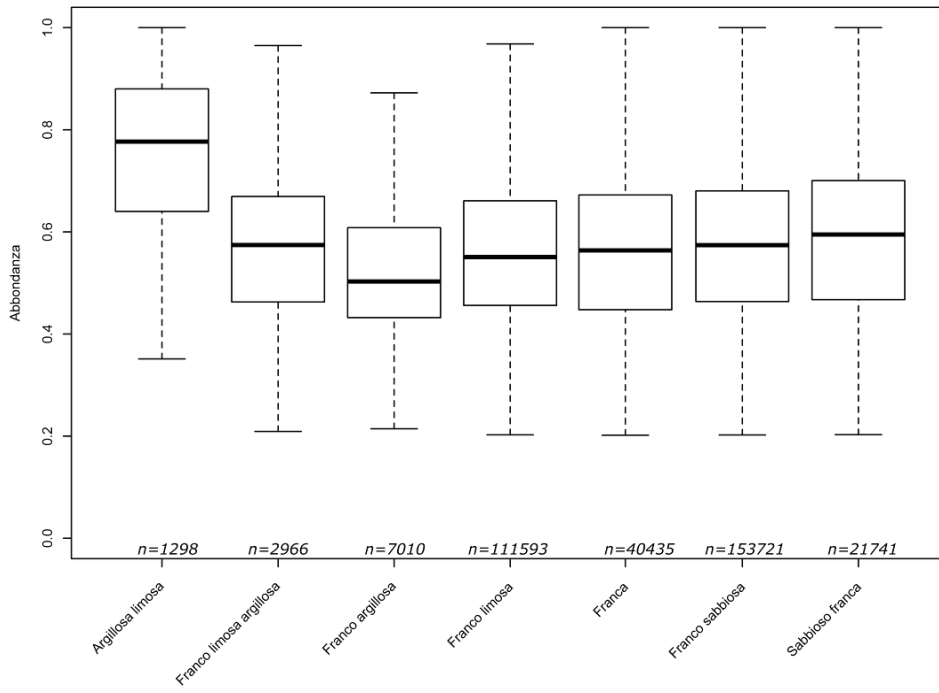


Appendice C – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 2, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:250.000.

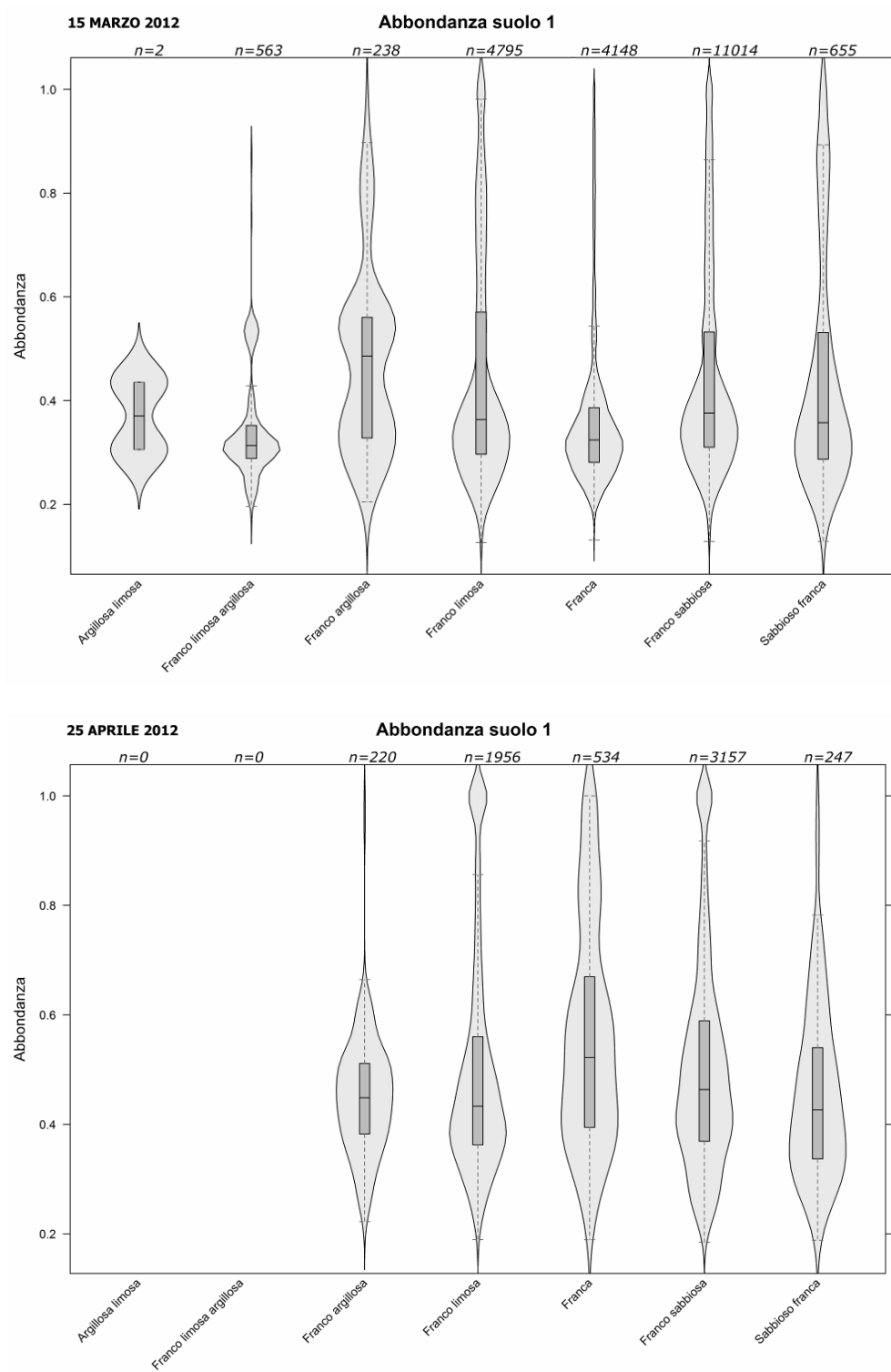


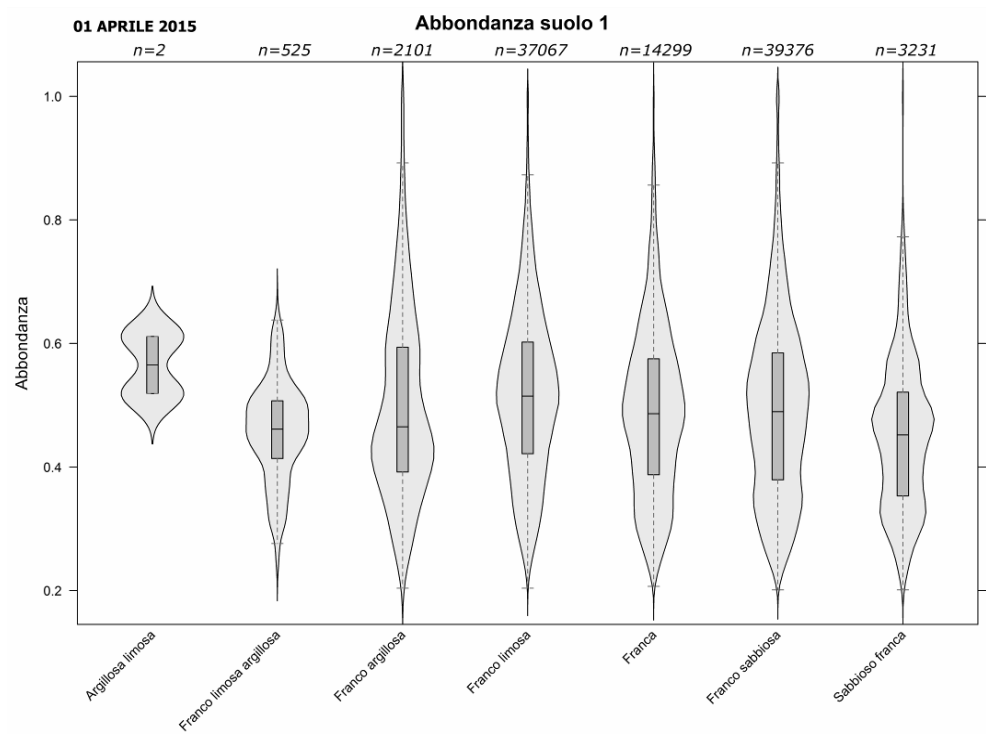
01 APRILE 2015

Abbondanza suolo 2

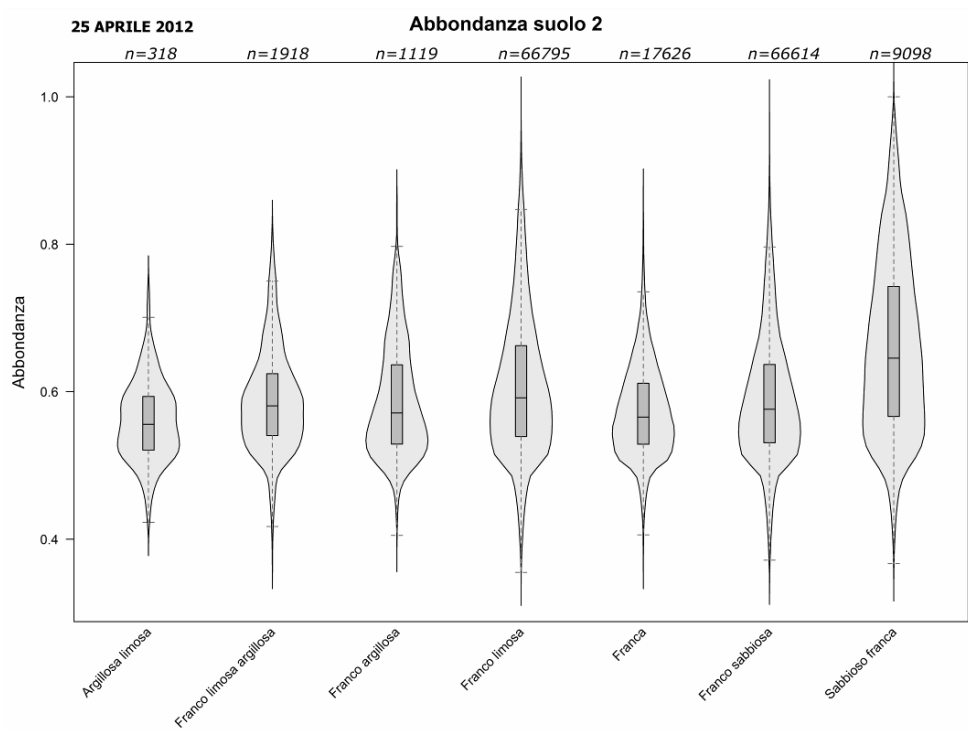
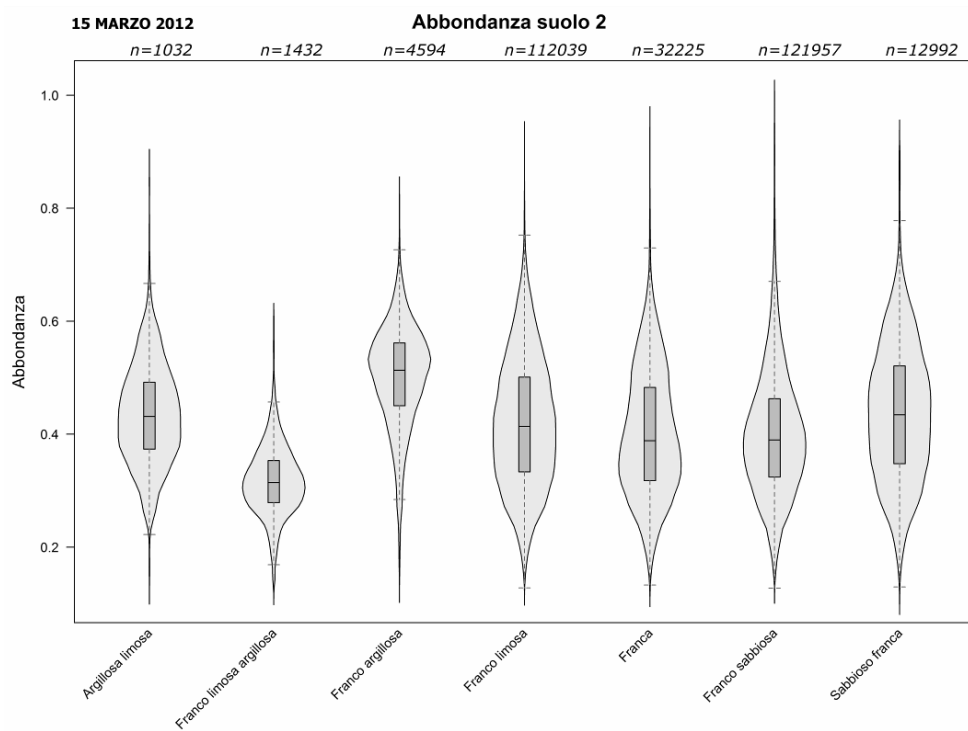


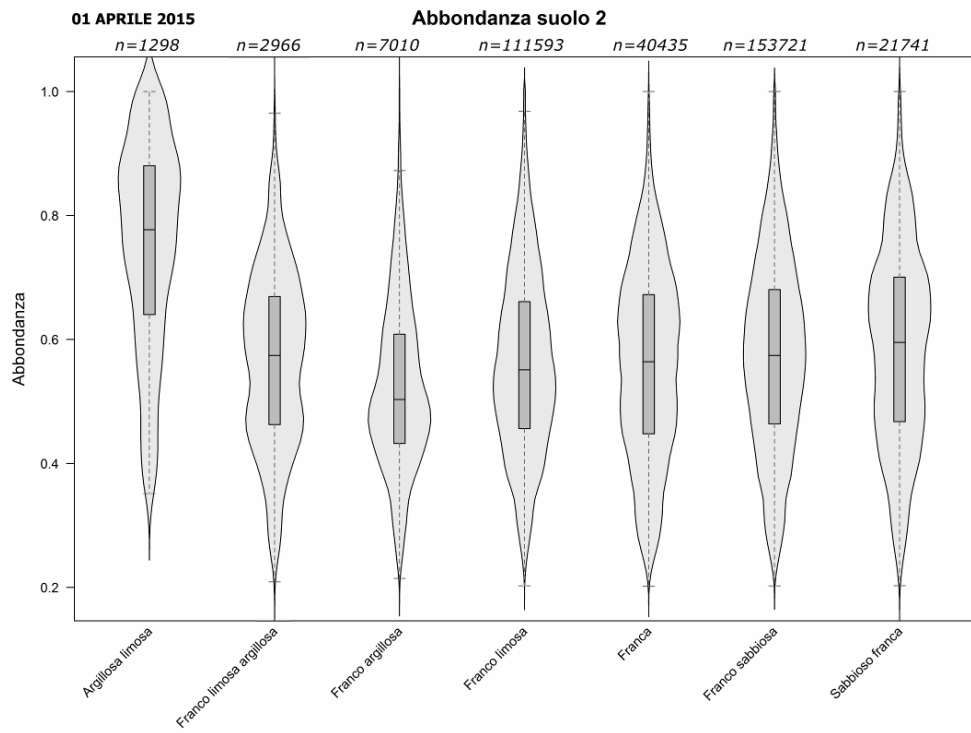
Appendice D – Violin Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 1, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:250.000.



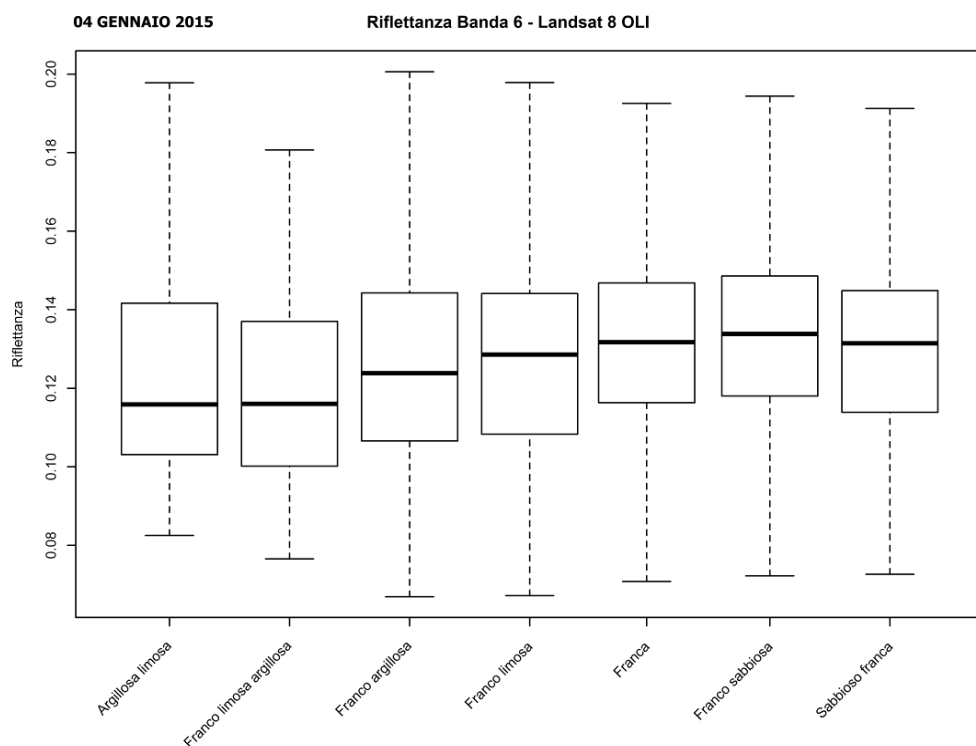
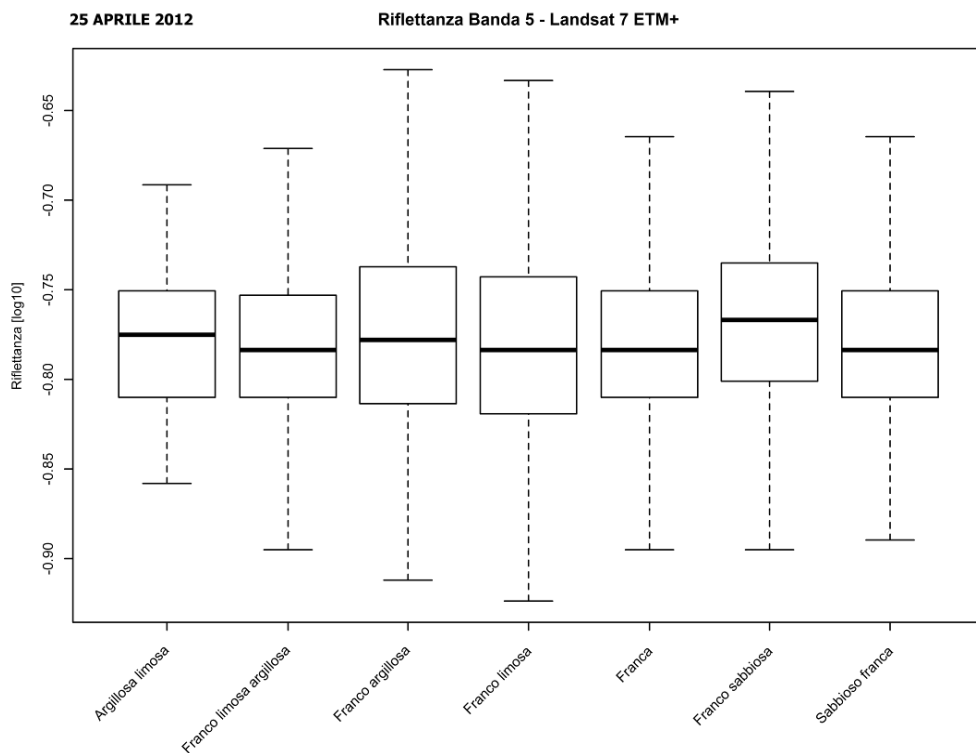


Appendice E – Violin Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 2, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:250.000.



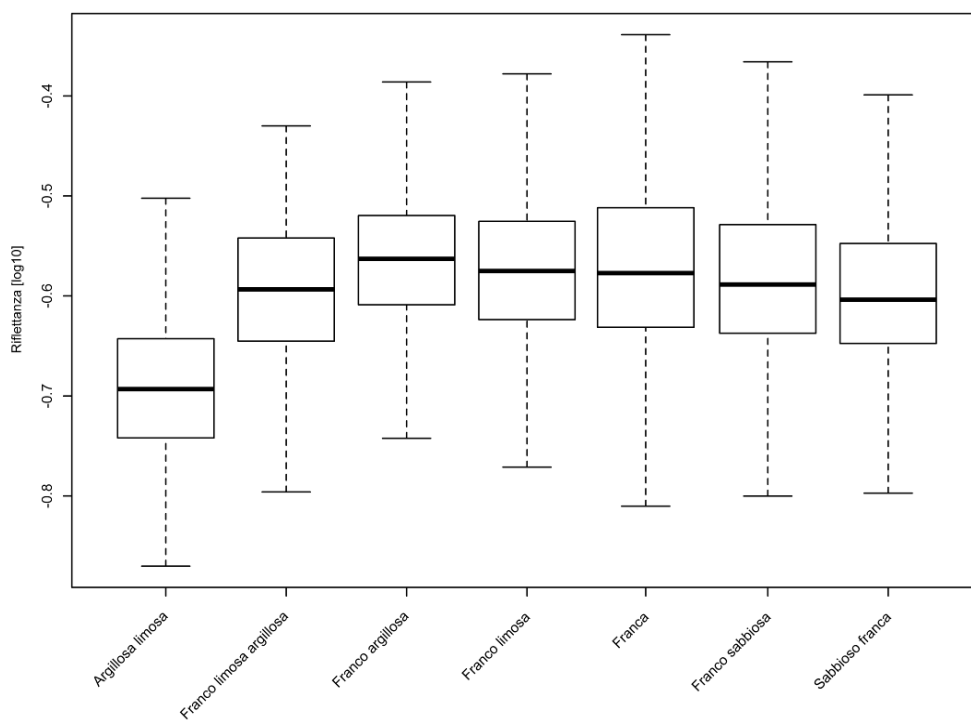


**Appendice F – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle riflettanze
relazionate con le classi tessiture della carta pedologica al 1:250.000.**

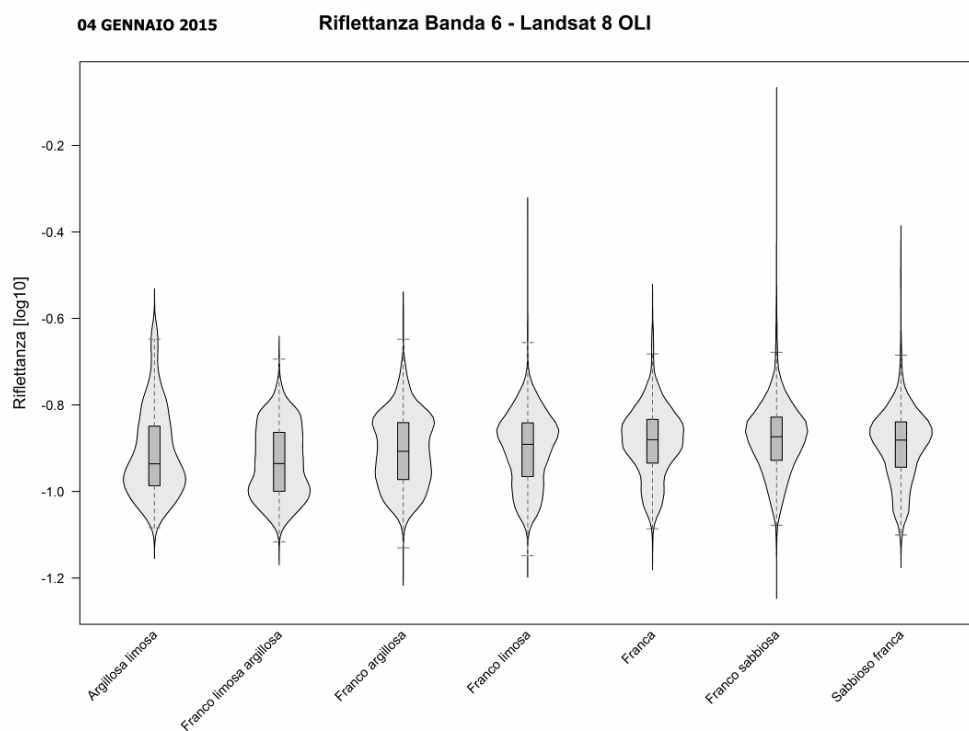
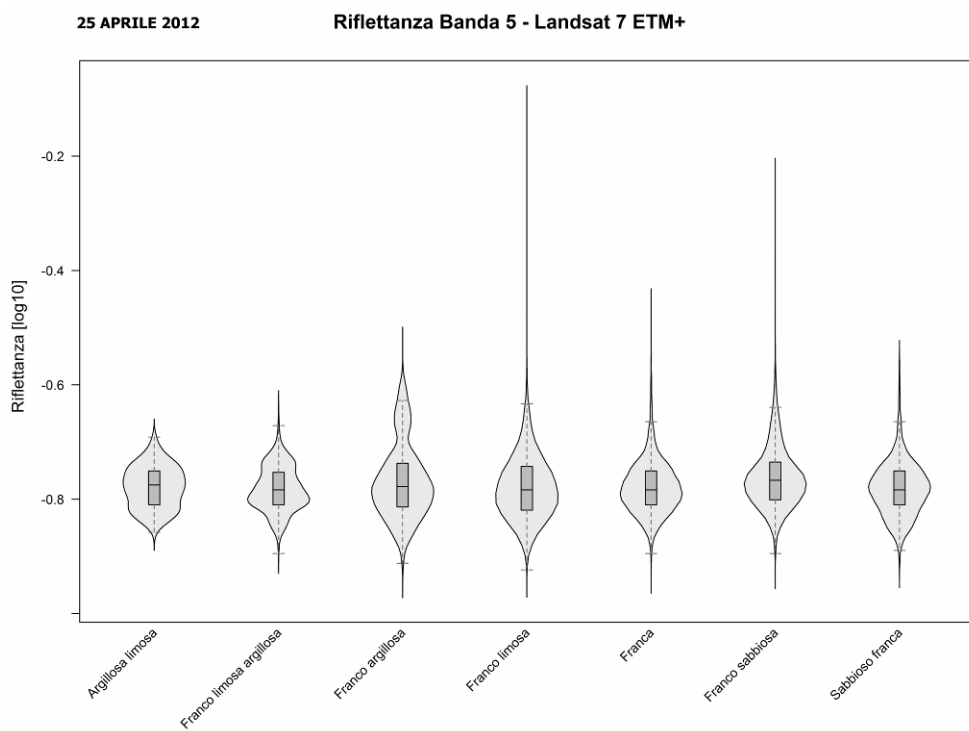


01 APRILE 2015

Riflettanza Banda 6 - Landsat 8 OLI

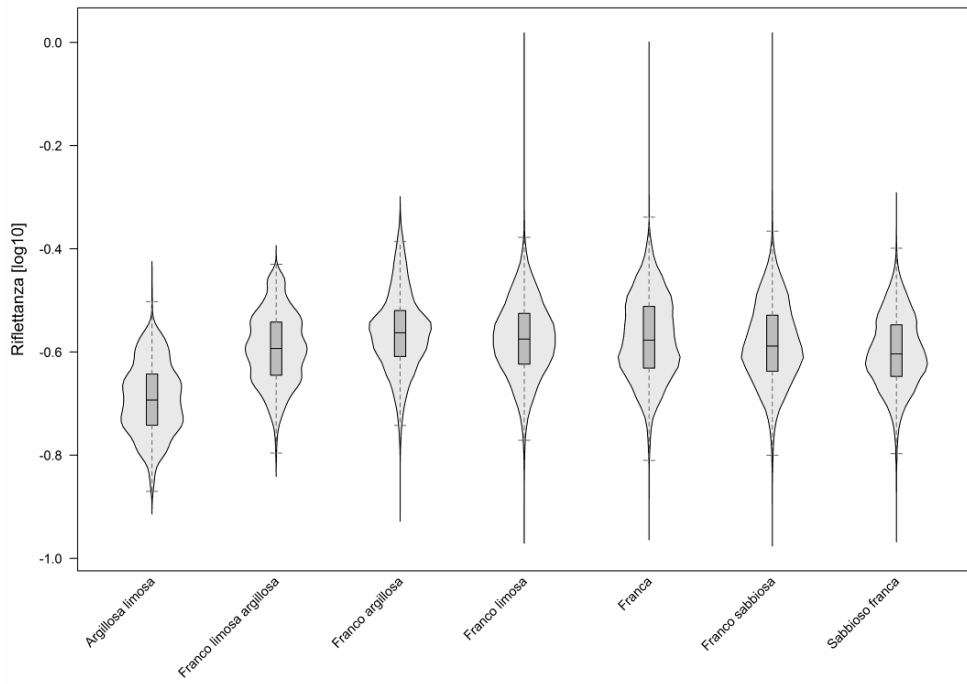


Appendice G – Violin Plot ottenuti dall'analisi delle riflettanze relazionate con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:250.000.

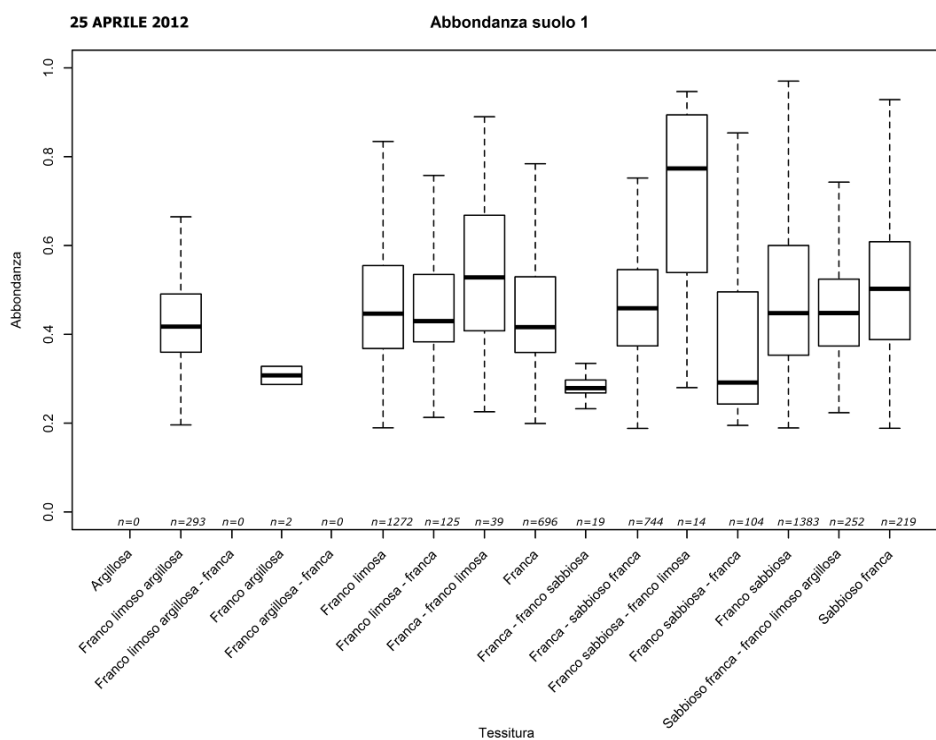
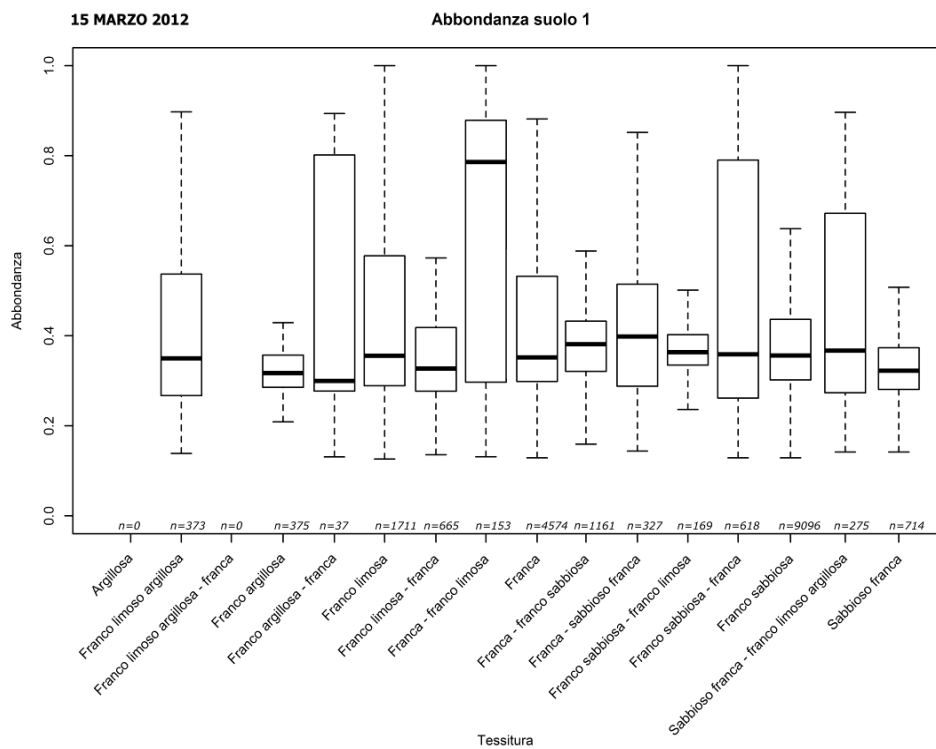


01 APRILE 2015

Riflettanza Banda 6 - Landsat 8 OLI

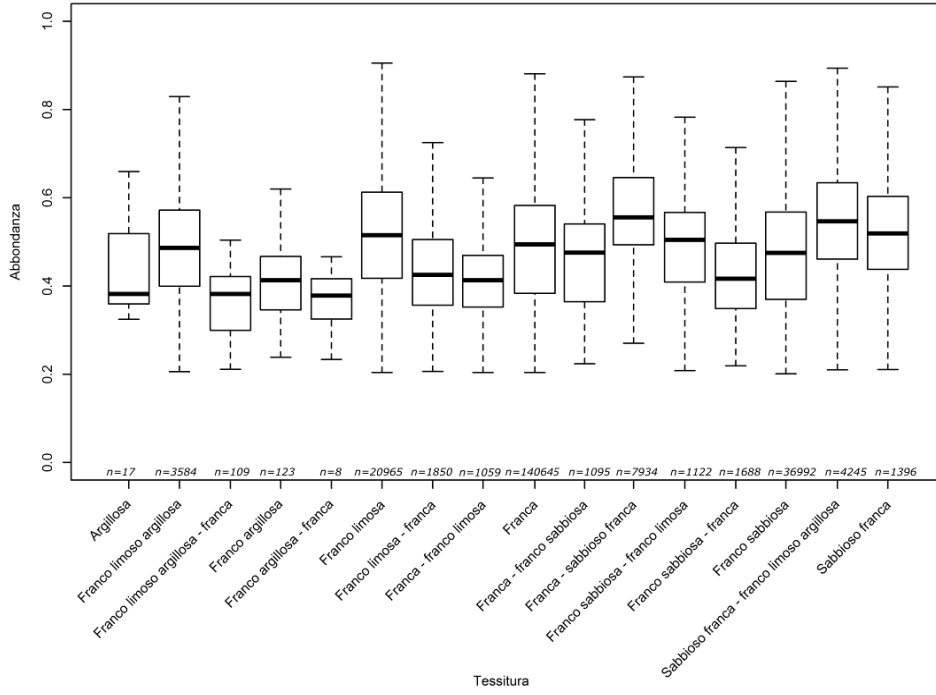


Appendice H – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 1, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:50.000.

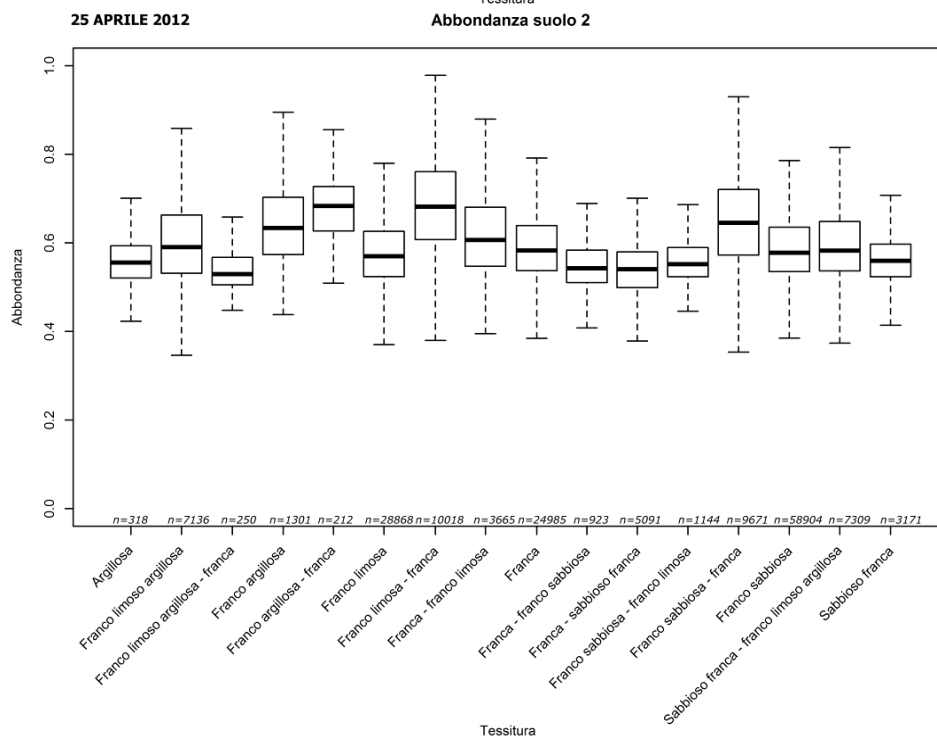
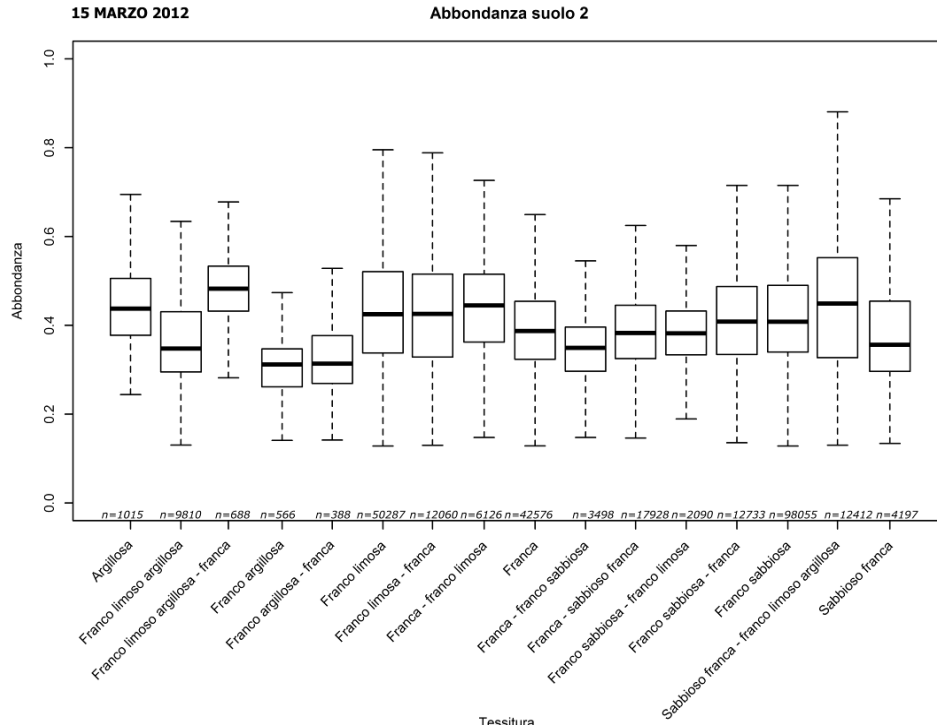


01 APRILE 2015

Abbondanza suolo 1

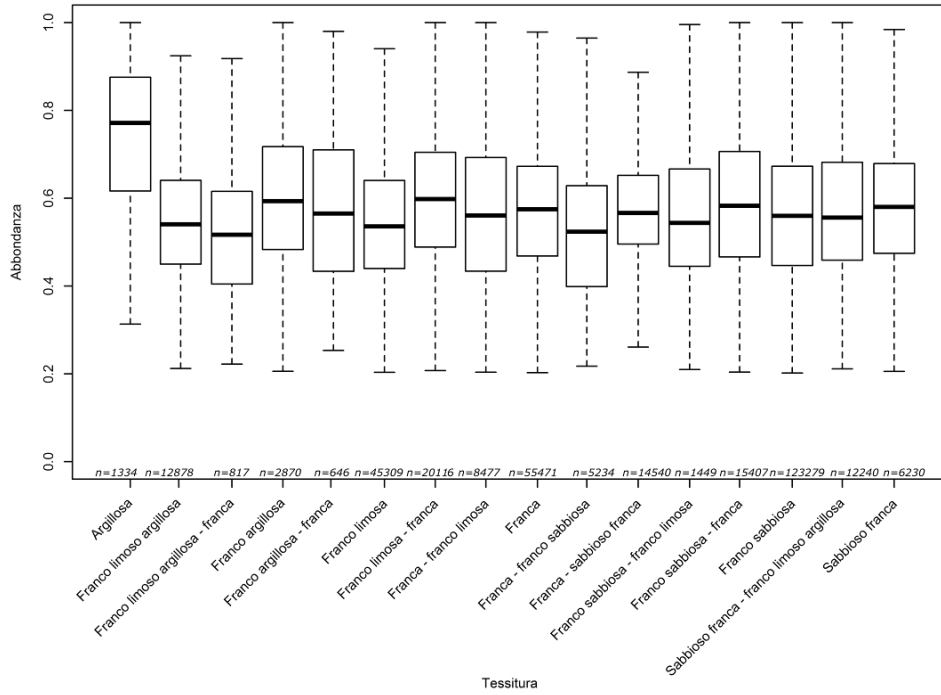


Appendice I – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 2, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:50.000.

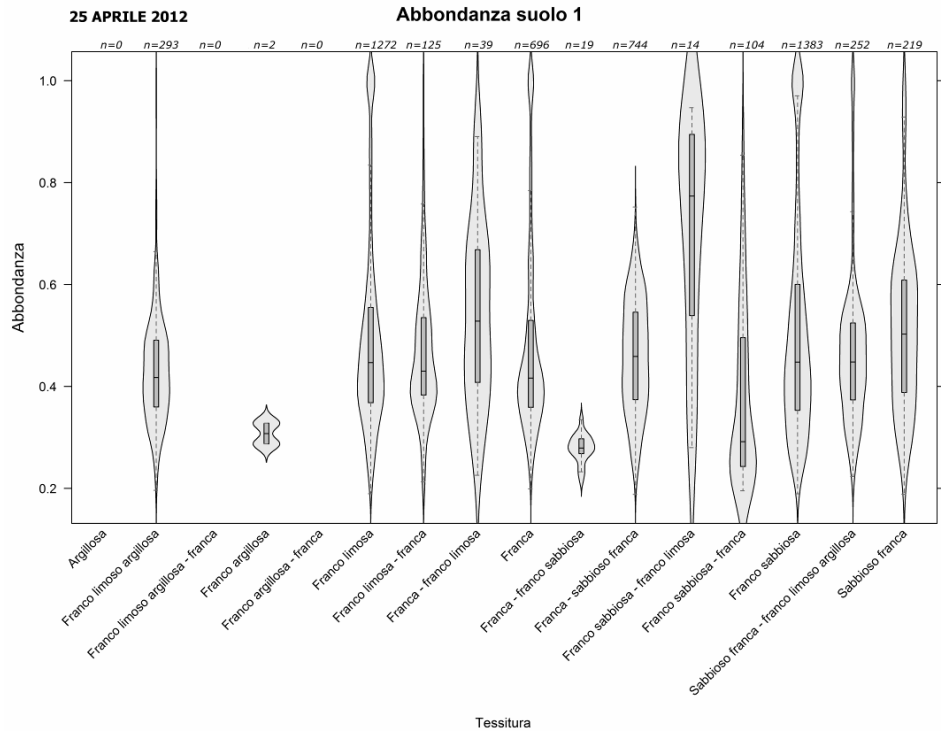
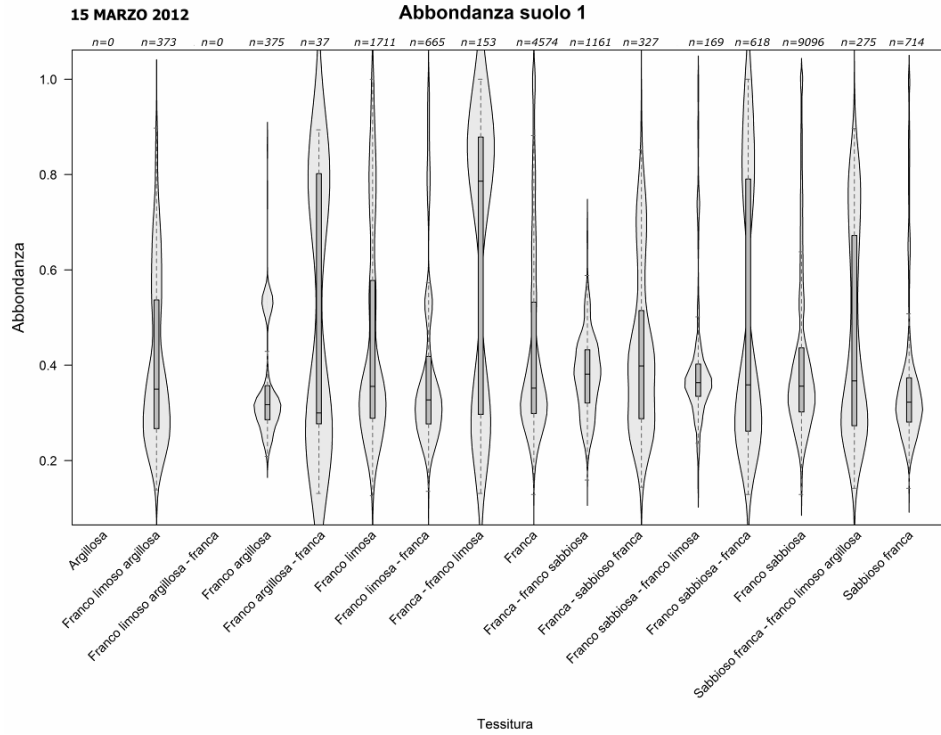


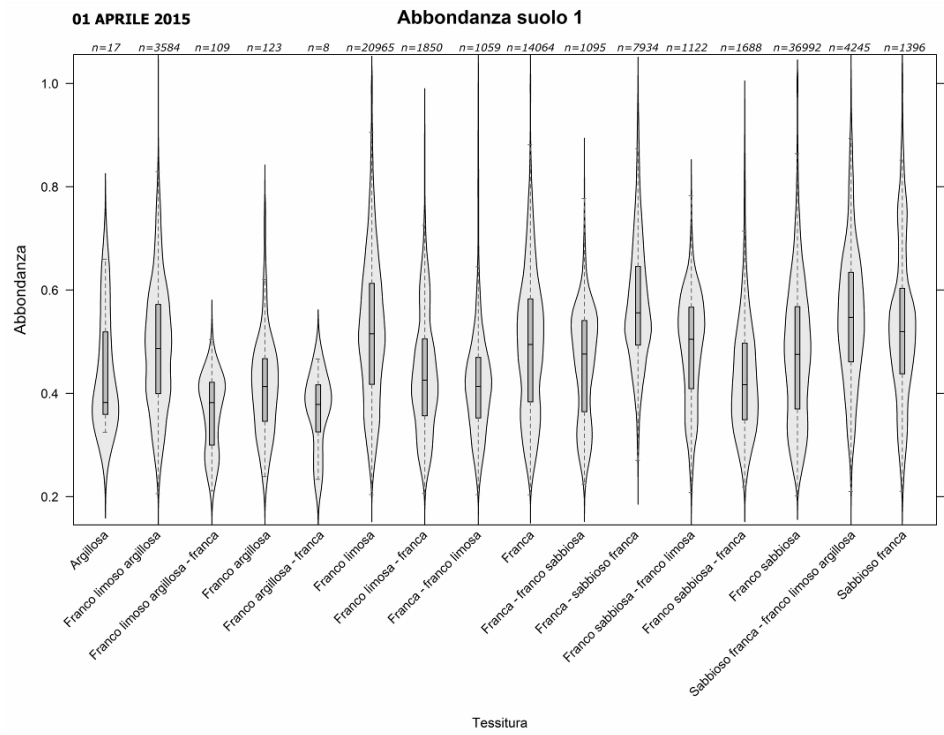
01 APRILE 2015

Abbondanza suolo 2

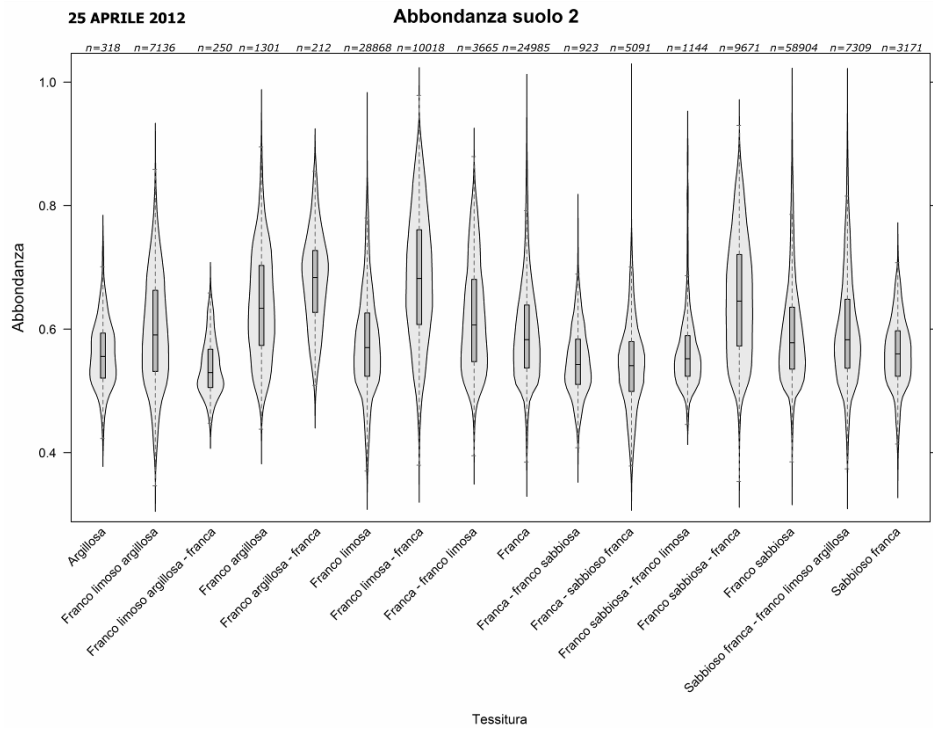
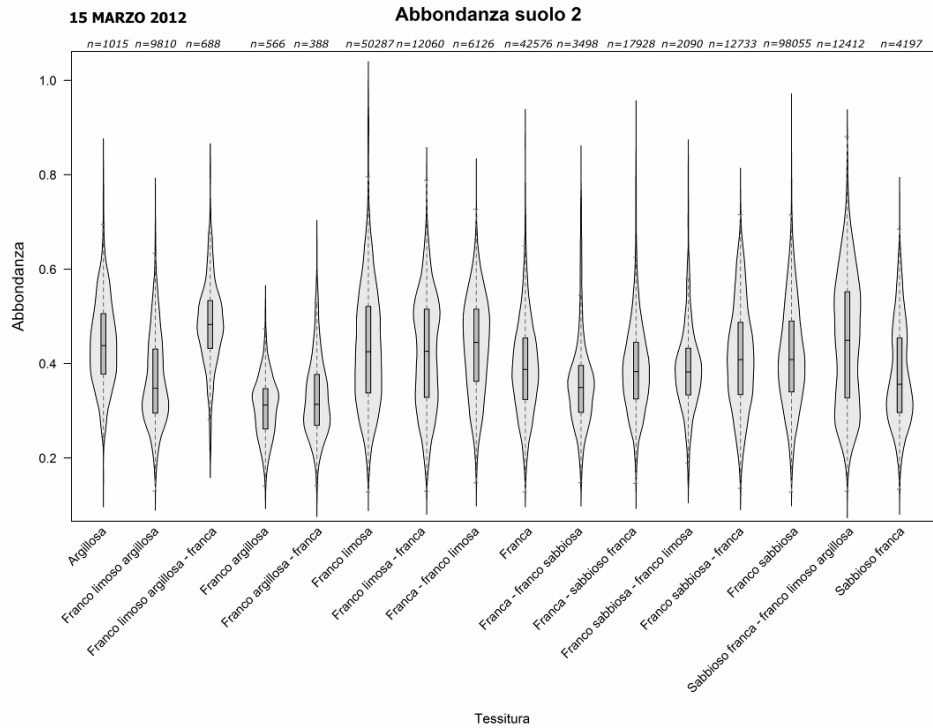


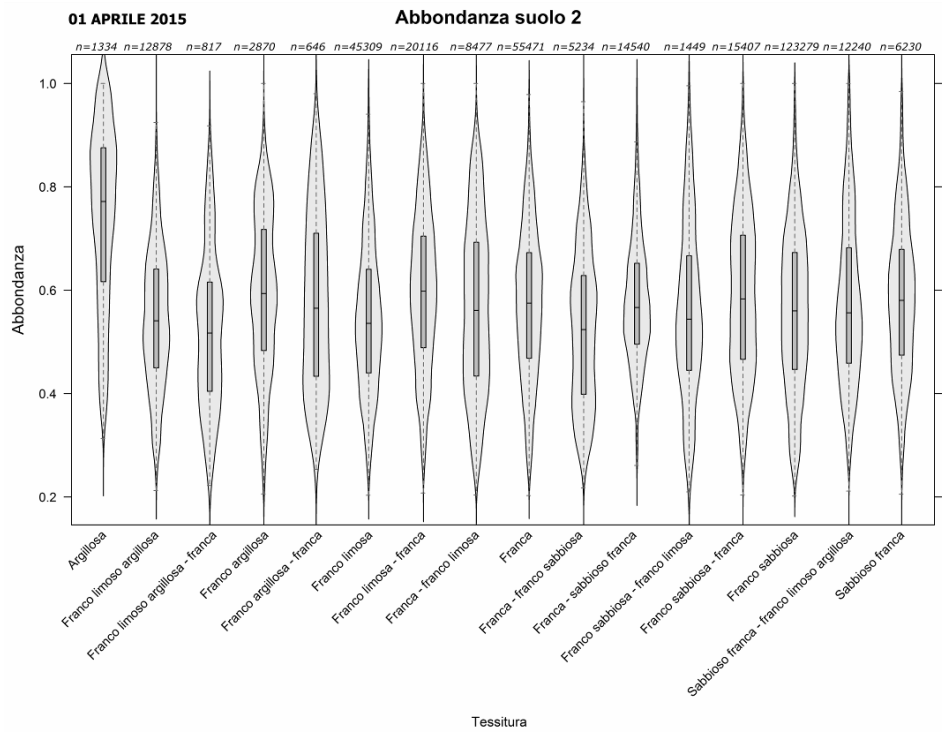
Appendice J – Violin Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 1, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:50.000.



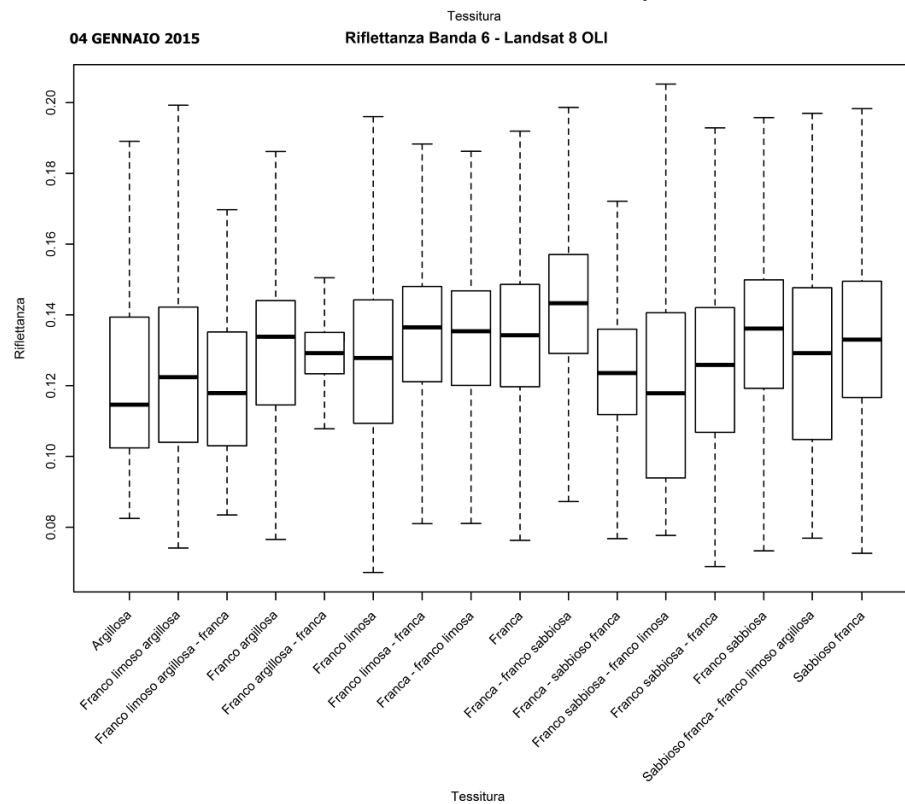
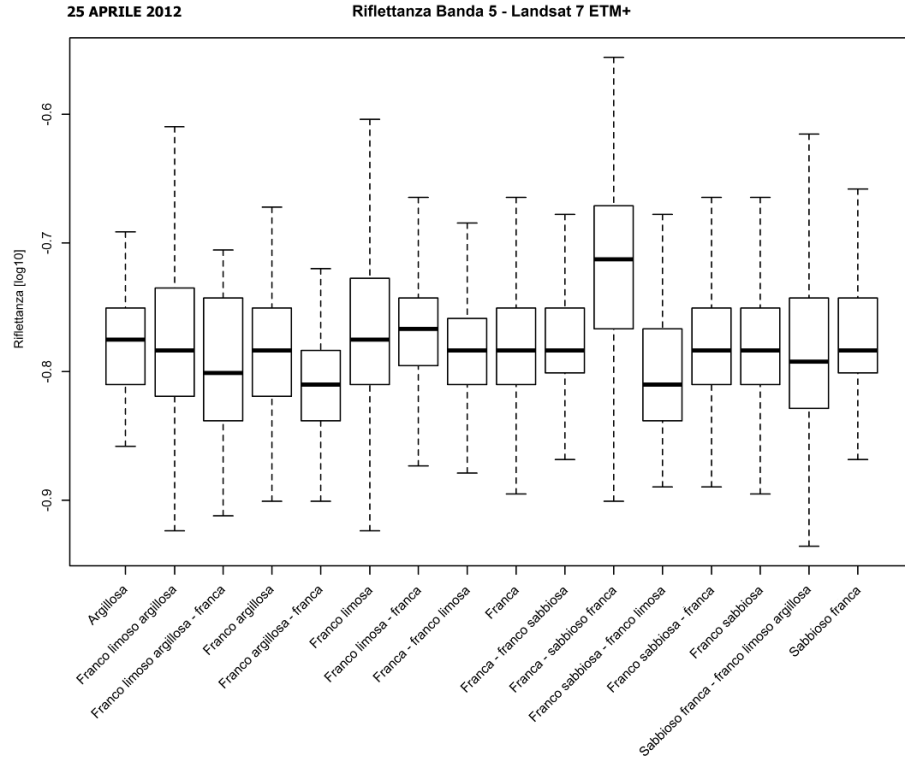


Appendice K – Violin Plots ottenuti dall’analisi delle abbondanze del suolo 2, in relazione con le tessiture della carta pedologica al 1:50.000.



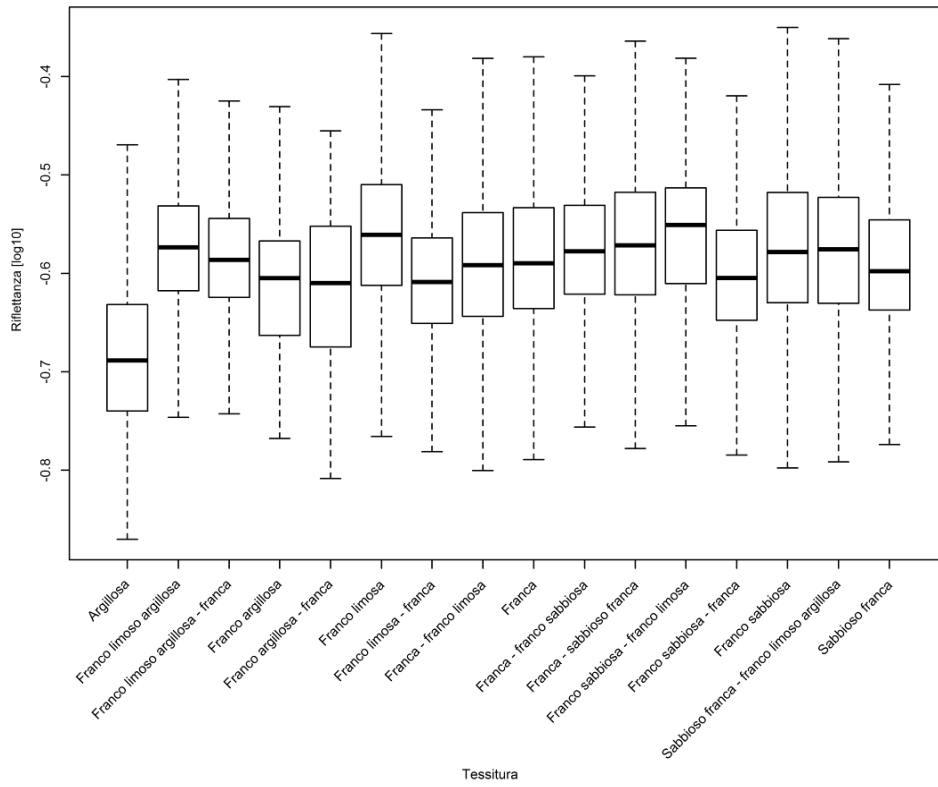


**Appendice L – Box/Whiskers Plots ottenuti dall’analisi delle riflettanze
relazionate con le classi tessiturali della carta pedologica al 1:50.000.**

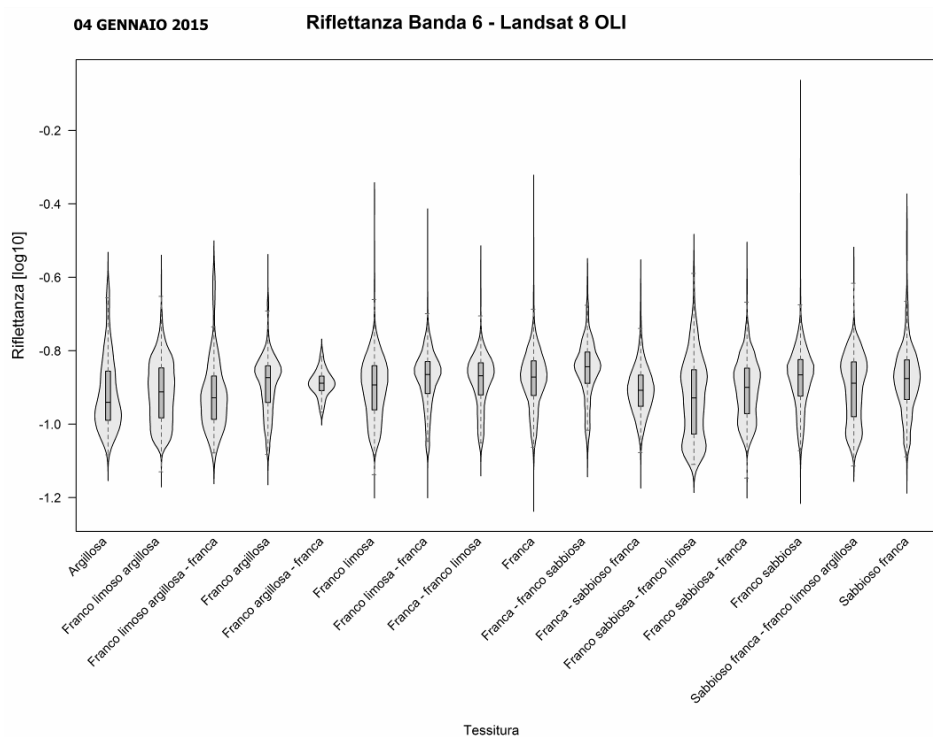
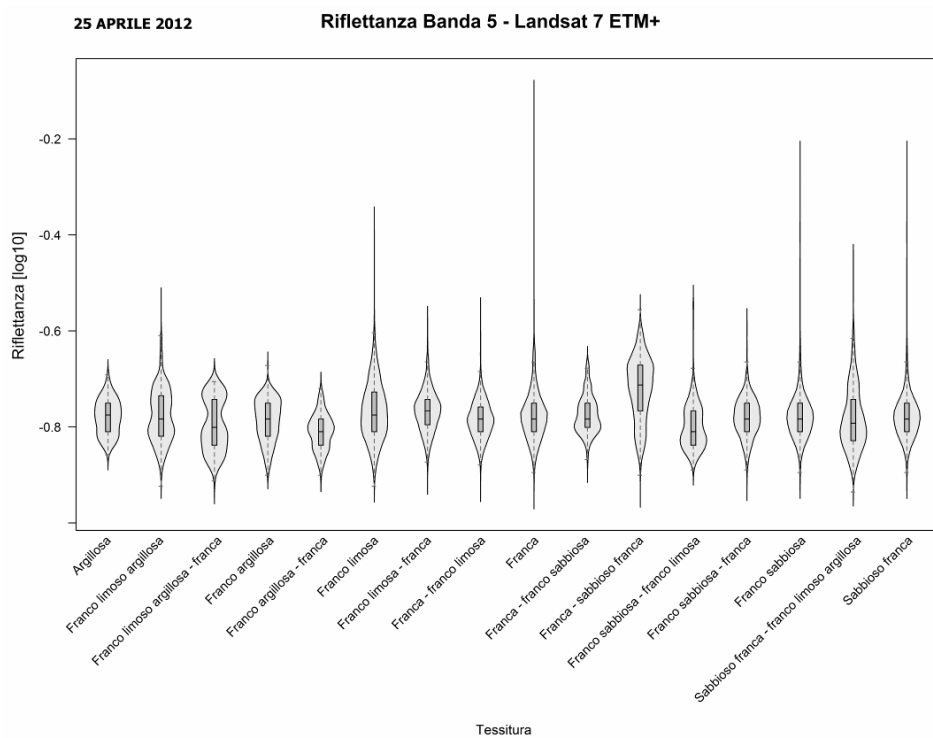


01 APRILE 2015

Riflettanza Banda 6 - Landsat 8 OLI



Appendice M – Violin Plot ottenuti dall’analisi delle riflettanze relazionate con le classi tessiture della carta pedologica al 1:50.000.



01 APRILE 2015

Riflettanza Banda 6 - Landsat 8 OLI

