

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Caratterizzazione della morfologia superficiale in
aree interessate da agricoltura convenzionale e
conservativa**

Relatore:

Prof. *Paolo Tarolli*

Correlatori:

Dott.ssa *Roberta Masin*

Dott. *Massimo Prosdocimi*

Laureando:

Marco Cecchin

Matricola n. 1105973

ANNO ACCADEMICO 2015 – 2016

Riassunto

La popolazione mondiale in continuo aumento necessita sempre più di elevate quantità di cibo. Questa situazione richiede grandi sforzi da parte del settore primario che svolge il ruolo principale nella produzione dei beni utili alla vita, attraverso l'agricoltura e l'allevamento.

Un'intensificazione delle lavorazioni del terreno in risposta alle richieste della popolazione ha però portato a un utilizzo non sostenibile delle risorse, in particolare del suolo.

Pertanto, è necessario adottare delle tecniche colturali più eco-sostenibili in confronto a quelle tradizionali e che permettono un uso corretto della risorsa suolo, limitando le perdite di terreno e di sostanza organica.

Un sistema di agricoltura che permette di raggiungere tali obiettivi è l'agricoltura conservativa, la quale prevede l'impiego delle rotazioni colturali, la coltivazione del terreno con tecniche di minima o nulla lavorazione e la protezione permanente del suolo tramite cover crops o pacciamatura in almeno il 30% del campo agricolo (FAO, 2013). In questo tipo di agricoltura, il disturbo arrecato alle componenti del suolo è minimo, permettendo lo sviluppo della sostanza organica, dell'attività biologica utile, della struttura e della stabilità del terreno.

Questi vantaggi sono fortemente correlati all'aspetto topografico che si osserva negli strati superficiali del terreno, il quale influenza la formazione e l'intensità dei fenomeni di runoff, compattamento, lisciviazione ed erosione del suolo.

L'obiettivo della tesi è stato quello di dimostrare se, dopo meno di due anni dalla conversione di un campo agrario alle tecniche conservative di no-tillage, siano facilmente rilevabili delle caratteristiche geomorfologiche leggermente o sostanzialmente diverse tramite l'utilizzo della recente tecnica fotogrammetrica SfM (Structure from Motion) e se queste alterazioni, secondo la logica dei processi di erosione superficiale, influenzerebbero la presenza e l'intensità di questi ultimi.

La costruzione di modelli digitali del terreno a elevata risoluzione, ottenuti grazie all'impiego delle recenti tecniche di telerilevamento o remote-sensing, permette di effettuare, in maniera non invasiva e in tempi relativamente brevi, uno studio dettagliato dei parametri morfologici che condizionano la topografia superficiale in

varie zone, al fine di dimostrare se esistono e quali sono le differenze più importanti della geomorfologia nelle aree interessate da diversi sistemi di agricoltura.

Alcune delle tecniche di remote-sensing, che permettono di ottenere una caratterizzazione della morfologia superficiale a elevata risoluzione, sono la tecnica LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), economicamente dispendiosa e di difficile impiego, e la tecnica SfM, poco costosa e facile da utilizzare.

In questa tesi, è stata utilizzata la tecnica fotogrammetrica SfM, attraverso la quale è stato possibile ricostruire i modelli digitali del terreno con una risoluzione portata fino a 1 cm.

Per ognuno dei sei DTMs (Digital Terrain Models), corrispondenti alle sei aree di studio scelte all'interno dell'Azienda Agraria Sperimentale "L.Toniolo", sono stati calcolati sette indici morfometrici, quali pendenza, mappa delle ombre, curvatura, scabrezza superficiale, connettività, direzioni del flusso e area drenata, per dimostrare una probabile variazione della morfologia superficiale nelle aree convertite all'agricoltura conservativa e, conseguentemente, un possibile cambiamento dei processi naturali, soprattutto quelli erosivi che ivi si innescano.

Dai valori di media, mediana, minimo, massimo, deviazione standard e indice di asimmetria, ottenuti per la curvatura media, la scabrezza superficiale e la connettività, è emerso che le superfici agrarie interessate da semina su sodo sono diverse da quelle lavorate con i sistemi convenzionali, già solo dopo circa 20 mesi.

Inoltre, dai risultati ottenuti è possibile fare una considerazione secondo la quale, le superfici agrarie prese in esame, interessate da no-tillage, presentano una topografia tale da mitigare l'intensità dei processi erosivi.

In questo modo, è stato possibile anche decretare se la tecnica SfM, che permette di ottenere ricostruzioni della topografia superficiale a elevata risoluzione, risulta essere efficace e fattibile per gli scopi previsti da questa tesi.

Abstract

The world population continually increases and needs more and more quantities of food. This situation asks for great efforts from the primary sector that has the principal role in the production of the useful goods for life, with the agriculture and the breeding.

An intensification of agricultural workings on the ground in answer to these requests of the world population has led to not sustainable utilization of the resources; in particular, of the soil.

For this reason, the scientific community is valuing which are the possible cultivation systems that allow a correct use of soil resources, limiting the losses of ground and organic matter.

A kind of agriculture that reaches these objectives is the conservation agriculture, which requests the use of the cultivation rotations, the cultivation of the ground with minimum or zero tillage and the permanent protection of the soil with cover crops or mulching in, at least, 30 % of the agricultural field (FAO, 2013). In this kind of agriculture, the disturbance brought to the components of the soil is very small and allows the development of the organic substance, of the useful biological activity, of the soil structure and the soil stability.

These advantages are strongly linked to the topographic aspect that is observed in the superficial layers of the ground, which influences the creation and the intensity of runoff phenomena, leaching and soil erosion.

The main goal of this thesis is to show that, after less than two years since the conversion of an agricultural field to no-tillage techniques, geomorphologic characteristics are easily and realistically calculated through the utilization of the recent SfM (Structure from Motion) photogrammetry technique and if these changes, according to the mechanism of soil erosion processes, would influence the presence and the intensity of these last ones.

The creation of digital terrain models with a high resolution, obtained thanks to the use of the recent remote-sensing techniques, lets to obtain, in a not invasive way and in a short time, a detailed study of the morphological parametres that modify the superficial topography in many areas, in order to demonstrate if they exist and which

are the most important differences of the geomorphology in the grounds interested by different systems of agriculture.

Some of remote-sensing techniques that let obtain a characterisation of the superficial morphology with a high resolution, are LiDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging), expensive and difficult to use, and SfM, cheaper and easy to use.

In this thesis, we have used SfM photogrammetry technique to create digital terrain models with a resolution carried up to 1 cm.

For each of the DTMs (Digital Terrain Models), corresponding to six study areas chosen inside the Experimental Agricultural Company “L.Toniolo”, were calculated seven morphometric indexes, such as slope, hillshade, curvature, roughness, connectivity, flow directions and contributing area, to show the probable variations of the superficial morphology in the areas converted to the conservation agriculture, and, consequently, a possible modification of the natural processes, above all those erosive ones that are triggered there.

With the analysis of the values of mean, median, minimum, maximum, standard deviation and skewness, obtained for the mean curvature, the roughness and the connectivity, it is observed that the agricultural surfaces interested by no-tillage are different from those ones tilled with conventional systems, after just 20 months.

Moreover, it is possible to make a consideration according to the obtained results, in fact, the agricultural surfaces studied and interested by no-tillage, have a topography that mitigates the intensity of soil erosion processes.

In this way, it is also possible to say if the SfM technique, which lets obtain digital models of the superficial topography with a high resolution, is efficient and feasible for the goals of this thesis.

INDICE

Riassunto.....	3
Abstract.....	5
1. Introduzione	13
1.1 Il suolo	13
1.2 L'agricoltura convenzionale	17
1.3 L'agricoltura conservativa	22
1.4 La topografia ad alta risoluzione	37
1.5 Obiettivo della tesi	43
2. Area di studio.....	45
2.1 L'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo"	45
2.2 Disegno sperimentale.....	49
3. Materiali e metodi	55
3.1 La tecnica fotogrammetrica "Structure from Motion"	55
3.2 I parametri morfometrici analizzati	64
3.2.1 La pendenza	64
3.2.2 La mappa delle ombre.....	67
3.2.3 La curvatura	69
3.2.4 L'indice di scabrezza superficiale.....	73
3.2.5 L'indice di connettività.....	75
3.2.6 Le direzioni del flusso.....	79
3.2.7 L'area drenata	84
3.3 Analisi statistica.....	86
4. Risultati e discussione.....	87
4.1 La pendenza	89
4.2 La mappa delle ombre.....	98
4.3 La curvatura	104
4.4 L'indice di scabrezza superficiale.....	114
4.5 L'indice di connettività.....	118
4.6 Le direzioni del flusso.....	122
4.7 L'area drenata	127
4.8 Analisi statistica.....	131

5. Conclusioni.....	149
Bibliografia.....	153

Indice delle figure

-Figura 1.1) Il crostone di lavorazione (Talarico, 2009)	20
-Figura 1.2) Alcune tecniche di conservation tillage (Don C. Reicosky, 2015)	29
-Figura 1.3) La differenza tra il DTM e il DSM (CHARTAGENA, 2011)	39
-Figura 1.4) Rappresentazione dei metodi ALS LiDAR, TLS LiDAR e SfM (Johnson et al., 2012).....	39
-Figura 2.1) Posizione dell’Azienda Agraria Sperimentale “L. Toniolo” nei pressi del Campus di Agripolis (Università degli Studi di Padova, 2016)	45
-Figura 2.2) L’ubicazione della stazione meteorologica (“X” rossa) del Comune di Legnaro all’interno dell’Azienda Agraria Sperimentale “L. Toniolo” (Google Earth, 2016)	47
-Figura 2.3) Posizione delle tre aree nel campo coltivato con tecniche conservative (C = Conservativo) e delle altre tre aree nel campo lavorato con metodi convenzionali (NC = Non Conservativo)	51
-Figura 2.4) Le foto di ognuna delle sei aree analizzate	53
-Figura 3.1) Uno dei targets infissi al suolo con l’uso di chiodi	56
-Figura 3.2) Fase di allineamento delle foto dell’Area 1C con Agisoft PhotoScan.....	58
-Figura 3.3) Il ricevitore GNSS Topcon Hiper V utilizzato per la georeferenziazione dei targets	59
-Figura 3.4) La nuvola di punti con i 10 targets georeferenziati dell’Area 1C	59
-Figura 3.5) L’Area 1C con le piantine di soia e la vegetazione infestante	61
-Figura 3.6) L’Area 1C pulita dalla vegetazione con CloudCompare	62
-Figura 3.7) Il DTM dell’Area 1NC a risoluzione di 1 cm	63
-Figura 3.8) Cella centrale “e” contornata dalle otto celle adiacenti e con differenti pendenze (Esri, 2010).....	64
-Figura 3.9) Rappresentazione grafica della curvatura del profilo con valore negativo (A), positivo (B) e uguale a zero (C) (Esri, 2010)	69
-Figura 3.10) Rappresentazione grafica della curvatura del piano con valore positivo (A), negativo (B) e uguale a zero (C) (Esri, 2010)	70
-Figura 3.11) Rappresentazione del calcolo della curvatura di un DTM cella per cella (Esri, 2010).....	71
-Figura 3.12) Costruzione delle sfaccettature triangolari con le relative variabili nella finestra di celle 3x3 (Tarboton, 1997)	80
-Figura 3.13) Rappresentazione dell’area drenata nell’Area 1C	84
-Figura 3.14) Boxplot dell’indice di scabrezza superficiale nell’Area 1C.....	86

-Figura 4.1) La pendenza misurata nell'Area 1C e nell'Area 1NC	90
-Figura 4.2) La pendenza nelle aree 2C, 3C, 2NC e 3NC.....	92
-Figura 4.3) I grafici relativi alla pendenza nelle sei aree di studio	94
-Figura 4.4) Rappresentazione della pendenza delle sei aree realizzata con una finestra mobile di dimensioni 45×45 cm.....	96
-Figura 4.5) Rappresentazione grafica della mappa delle ombre per le sei aree di studio.....	99
-Figura 4.6) Rappresentazione dei DTMs sovrapposti alla mappa delle ombre delle sei aree ..	101
-Figura 4.7) Rappresentazione della curvatura media nell'Area 1C a diverse grandezze della finestra mobile (W.S.=Window Size).....	105
-Figura 4.8) Rappresentazioni della curvatura minima nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)	107
-Figura 4.9) Rappresentazioni della curvatura massima nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)	110
-Figura 4.10) Rappresentazioni della curvatura media nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)	112
-Figura 4.11) Rappresentazione dell'indice di scabrezza superficiale nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm).....	115
-Figura 4.12) Rappresentazione dell'indice di connettività nelle sei aree di studio	119
-Figura 4.13) Rappresentazione delle direzioni del flusso nell'Area 1C e Area 1NC.....	123
-Figura 4.14) Rappresentazione delle direzioni del flusso nelle restanti quattro aree analizzate.....	125
-Figura 4.15) Rappresentazione dell'area drenata delle sei aree di studio.....	128
-Figura 4.16) I grafici relativi alla curvatura media calcolata per le sei aree di studio.....	133
-Figura 4.17) Rappresentazione dei boxplots relativi alla curvatura media presente nelle sei aree analizzate.....	135
-Figura 4.18) I grafici delle distribuzioni dei punti e i loro relativi valori dell'indice di scabrezza superficiale	138
-Figura 4.19) Rappresentazione dei boxplots relativi all'indice di scabrezza superficiale nelle sei aree analizzate	140
-Figura 4.20) I grafici relativi all'indice di connettività calcolato per le sei aree di studio	144
-Figura 4.21) Rappresentazione dei boxplots relativi all'indice di connettività nelle sei aree analizzate.....	146

Indice delle tabelle

-Tabella 1.1) I consumi di energia effettuati per vari tipi di lavorazione (Talarico, 2009).....	19
-Tabella 1.2) Le superfici dedicate al no-tillage in alcune nazioni europee (Soane et al., 2012).....	24
-Tabella 2.1) I valori delle analisi del suolo eseguite dal Laboratorio DAFNAE.....	49
-Tabella 3.1) RMSE calcolato da PhotoScan per le sei aree di studio	60
-Tabella 3.2) I valori delle variabili e e a utili al calcolo della direzione del flusso (Tarboton, 1997).....	82
-Tabella 4.1) I dati calcolati con MATLAB relativamente alla curvatura media delle sei aree	131
-Tabella 4.2) I dati calcolati con MATLAB relativamente all'indice di scabrezza superficiale delle sei aree	136
-Tabella 4.3) I dati calcolati con MATLAB relativamente all'indice di connettività delle sei aree	141

1. Introduzione

L'agricoltura è l'arte di coltivare il suolo al fine di ottenere materie prime per l'industria e prodotti utili all'alimentazione dell'uomo e degli animali (Treccani, 2013).

La richiesta di cibo da parte della popolazione globale in continua crescita (si stima toccherà la quota di 9 miliardi di persone nel 2050) ha spinto il settore primario verso un sistema di agricoltura che viene detto "intensivo", il quale utilizza grandi quantità di energia per coltivare varietà migliorate geneticamente che consentono rese elevate.

In questo modo, la biodiversità caratteristica del paesaggio agrario è diminuita, sono sorte maggiori problematiche relative alla protezione delle piante che ha portato ad una dipendenza dell'agricoltura dal mezzo chimico e le colture sono divenute sempre più esigenti in termini di concimazione, portando a un uso a volte eccessivo di fertilizzanti chimici. Inoltre, l'eccessivo sfruttamento del suolo da parte dell'agricoltura ha causato fenomeni di erosione e impoverimento di questa risorsa che la FAO nel 2015, *International Year of Soil*, ha definito come "risorsa non rinnovabile" la cui "conservazione è fondamentale per la sicurezza alimentare e il nostro futuro sostenibile" (FAO, 2015). La nuova sfida dell'agricoltura moderna sarà quella di produrre sempre più cibo con tecniche sostenibili, rispettose dell'ambiente e della risorsa suolo.

1.1 Il suolo

Il suolo può essere definito come lo strato detritico superficiale della crosta terrestre, capace di ospitare la vita delle piante ed è composto da sostanze organiche, particelle minerali, acqua, aria, organismi viventi ed è sede di processi chimico-fisici che ne determinano una continua evoluzione (Franz, 1949). Esso è il prodotto di articolati meccanismi che lo trasformano continuamente in base alle condizioni ambientali in cui si trova, portando alla realizzazione di conseguenti nuovi equilibri biologici.

Si tratta di un sistema aperto e complesso formatosi dalla continua attività di numerosi processi chimici, fisici e biologici che interagiscono sinergicamente o contrastandosi; essi sono descritti dall'Equazione di Jenny (Jenny, 1961):

$$S = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t})$$

dove

cl = clima, temperatura, umidità

o = organismi viventi

r = rilievo, pendenza del versante, esposizione

p = roccia madre, materiale di partenza

t = tempo trascorso dall'inizio della trasformazione del suolo

Tra le sue principali funzioni si possono elencare:

- il sostegno fisico fornito alle piante tramite l'ancoraggio delle radici;
- la capacità di essere una fonte disponibile di elementi nutritivi essenziali per la vita dei vegetali;
- la fertilità che permette al suolo di fornire il migliore rendimento possibile considerando le tecniche agronomiche e la situazione pedoclimatica presente;
- l'accumulo di anidride carbonica nell'aria tellurica;
- l'aiuto fornito alle piante nella cattura del carbonio durante la fotosintesi;
- la contemporanea attività di importante deposito di carbonio ed emettitore di gas serra (Houghton, 2003);
- la capacità di trattenere l'acqua favorendo i fenomeni di infiltrazione ed evitando i ristagni superficiali;
- l'ambiente idoneo per consentire la sepoltura dei semi e lo sviluppo ottimale delle attività fisiologiche delle radici delle piante;
- l'immagazzinamento di materiali organici e inorganici;
- l'importanza del ruolo che ricopre nella sicurezza alimentare e nei servizi ecosistemici;
- l'adattabilità ai cambiamenti climatici e la loro mitigazione;
- la capacità di ospitare numerosi microrganismi che producono varie trasformazioni di tipo biochimico.

Il suolo è formato da tre fasi: fase solida, fase liquida e fase gassosa (Violante, 2002). La fase solida è la principale riserva di nutrienti disponibili per la pianta ed è costituita da una componente inorganica e una organica. La prima è formata da minerali, materiali amorfi, frammenti di rocce; la seconda si compone di sostanze umiche, biomassa varia, residui animali e vegetali. La fase liquida è costituita dall'acqua in cui si trovano disciolti O_2 , CO_2 , colloidali, sostanze nutritive organiche e inorganiche principalmente in forma ionica. La fase gassosa è formata da una miscela di gas e vapore acqueo ed è definita aria tellurica perché presenta un contenuto di vapore e di CO_2 diverso rispetto all'aria atmosferica.

La SSSA (1997) definisce il grado di qualità del suolo come la capacità di funzionare entro i limiti di un ecosistema naturale o antropico, per sostenere la produttività di piante e animali, mantenere e migliorare la qualità dell'acqua e dell'aria, sostenere la salute e la dimora umana. Per avere un terreno di buona qualità, esso deve presentare delle percentuali che si avvicinino al 50% di fase solida di cui il 45% costituito da minerali e il 5% da sostanza organica, al 25% di fase liquida e il restante 25% di fase gassosa (Call e Extension, 1999).

Il suolo è una risorsa limitata che ricopre 1/16 delle terre emerse del nostro pianeta (ARPAV, 2012). Nonostante ciò, in economia, il suolo non è considerato come un bene scarso e si ritiene che il suo valore non sia mai stato effettivamente ricercato. Lo dimostra la mancanza di una remunerazione delle risorse naturali causata dalle teorie dell'economia classica che hanno accompagnato l'industrializzazione (Chang et al., 2005). Dall'analisi delle basi teoriche dell'economia si evidenzia la complessità dell'identificazione della correlazione tra beni pubblici e attività agricola, poiché essi comprendono ulteriori beni di natura sia pubblica sia privata (produzione degli alimenti, aumento della vitalità rurale, riduzione dei gas serra, biodiversità agraria, aumento del carbonio nel suolo, qualità dell'aria, sicurezza alimentare, prevenzione di frane e smottamenti, qualità delle acque, eterogeneità del paesaggio, benessere degli animali, adattabilità a episodi catastrofici come incendi e inondazioni, ecc.).

Nei campi europei, il 45% dei suoli presenta una concentrazione di S.O. (sostanza organica) molto scarsa con percentuali che variano dallo 0 al 2% e un altro 45% presenta valori medi compresi tra il 4 e il 6% (Rusco et al., 2001). In particolare, nell'Europa meridionale si nota che ben il 74% dei terreni ha meno del 2% di sostanza organica nei primi 30 cm di profondità (Zdruli et al., 2004), come nel bacino del Mar Mediterraneo dove i valori di S.O. sono precipitati sotto la soglia dell'1% creando numerose problematiche sia agrarie che sociali e ambientali.

La sostanza organica presente nel suolo permette alle piante di ricevere i nutrienti necessari alla propria sopravvivenza, essa è costituita da quattro componenti: i residui animali e vegetali decomposti o in fase di decomposizione costituiscono il 10% della sostanza organica; la biomassa degli organismi viventi costituisce solamente il 5% della sostanza organica totale ed è formata per il 60-90% da microflora e per il restante 40-10% da microfauna, mesofauna e macrofauna terricola (Nannipieri, 1993); la sostanza organica di origine sintetica è costituita da prodotti derivati da sintesi industriale e rilasciati dall'uomo nell'ambiente (concimi artificiali, fitofarmaci, ecc.); le sostanze umiche generate dai processi di degradazione microbica dei residui vegetali e animali costituiscono il 40-60% della sostanza organica (Bot e Benites, 2005) e permettono l'adsorbimento di ioni, trattengono l'acqua, consentono al suolo di essere fertile. Attraverso il processo di mineralizzazione delle sostanze umiche si ottengono gli elementi nutritivi per le piante (Dell'Agnola e Nardi, 1993).

La sostanza organica produce numerosi effetti benefici al suolo come:

- l'aggregazione con l'aumento conseguente della porosità, dello sviluppo radicale, del drenaggio, dello scambio di gas, della ritenzione idrica (De Nobili e Maggioni, 1993a);
- la capacità di scambio cationico che, aumentando, permette di trattenere più elementi nutritivi nel terreno in grado di essere prontamente utilizzati dalle piante. Conseguentemente a ciò si accresce la fertilità del suolo, cioè il rendimento massimo ottenibile da un suolo coltivato con opportuni interventi agronomici e con specie vegetali adatte alle condizioni pedoclimatiche presenti;
- l'acidificazione del terreno causata dalla respirazione della biomassa microbica produce degli acidi organici che solubilizzano i silicati rendendo assimilabili i microelementi nutritivi che li costituiscono (De Nobili e Maggioni, 1993b);
- la formazione di chelati che sono complessi molecolari formati da un microelemento nutritivo isolato (Fe, Zn, Cu, Ni, Co e Mn) e un elemento della sostanza umica (polisaccaridi acidi, amminozuccheri, siderofori, acidi uronici) e presentano un'elevata facilità di assorbimento da parte delle piante (Organic Soil Technology, 2013);
- la presenza di microrganismi che svolgono un importante ruolo nella degradazione dei residui vegetali e animali, nella formazione della struttura del suolo, nei cicli dei vari nutrienti, nella disintossicazione del sottosuolo dai prodotti inquinanti (Sparling, 1992; Brooks et al., 2008);
- la rimozione di fenomeni asfittici grazie alla formazione di processi di ossidoriduzione del suolo che conferisce a quest'ultimo una buona struttura, una elevata porosità, un buon drenaggio e un'ottima aerazione.

1.2 L'agricoltura convenzionale

Le tecniche di agricoltura intensiva si sono affermate durante la Rivoluzione Verde dei primi anni '50 e oggi vengono anche classificate come tecniche di agricoltura "convenzionale". In quel periodo lo scopo dell'agricoltura era quello di incrementare le produzioni introducendo varietà ibride più performanti, ben adatte alla raccolta meccanizzata, che possedevano una buona risposta alle concimazioni chimiche, con una maggiore longevità alla conservazione (Conselvan, 2013).

Con il termine "agricoltura convenzionale" s'intende una qualsiasi tipologia di coltivazione che lascia meno del 15% dei residui colturali in campo (CTIC, 2004) e prevede la preparazione di un letto di semina con una prima aratura seguita da successive lavorazioni di affinamento degli aggregati del suolo per liberarlo dai resti della vegetazione e facilitando la semina (Aina, 2011). Il residuo colturale viene definito come la porzione epigea delle piante coltivate che non viene considerata un utile componente della raccolta (Soane et al., 2011).

Nel 2010, l'agricoltura convenzionale in Europa era adottata nel 74% dei terreni agrari, in Italia nel 90% (Eurostat, 2013). Questo tipo di agricoltura sta subendo un decremento della superficie a essa destinata poiché presenta numerosi svantaggi che si scontrano con le molteplici richieste eco-sostenibili avanzate dalle organizzazioni governative internazionali.

Le tecniche convenzionali utilizzano fondamentalmente l'aratro, uno strumento usato dall'uomo sin dall'antichità. L'aratura consiste nell'inversione degli strati del suolo ed è la prima tra le operazioni che hanno come obiettivo la preparazione di un letto di semina adeguato per la coltura. L'aratro permette di effettuare il taglio verticale e orizzontale, il sollevamento e il ribaltamento delle zolle. In questo modo risulta possibile ottenere un migliore interrimento dei concimi, l'essiccamento degli apparati di riproduzione della vegetazione infestante rovesciati verso la luce solare, una soppressione tramite interrimento della vegetazione preesistente, una migliore sofficità del suolo, che permette alle radici di muoversi più liberamente ed esplorare un'area più ampia.

A questi vantaggi si aggiunge, tuttavia, una serie di problematiche che fanno sempre più diminuire le superfici in cui viene adottata questa tecnica agricola e aumentano la probabilità che questa tipologia di agricoltura venga sostituita da altre meno impattanti.

Molti studiosi oggi ritengono l'agricoltura di tipo intensivo non più sostenibile, a causa dell'uso di risorse non rinnovabili, della degradazione del suolo, della mancanza di avvicendamenti colturali e della riduzione di biodiversità. Gli svantaggi dell'adozione di tecniche agrarie di tipo convenzionale sono:

- le elevate emissioni di gas serra derivanti dall'utilizzo di macchine che usano combustibili fossili e dal ribaltamento delle zolle di terreno che liberano la CO₂ immagazzinata nel sottosuolo (Reicosky e Archer, 2007);
- il compattamento del terreno in caso di lavorazioni non ottimali, che favorisce i fenomeni di ruscellamento, lisciviazione e ristagno delle acque con relativo trasporto degli agenti chimici nelle falde o in aree limitrofe, impedendo inoltre lo scambio e l'immagazzinamento di acqua, gas e sostanza organica (Brussaard e Van Fassen, 1994). L'accumulo superficiale di acqua sul terreno causa importanti fenomeni di ristagno che comportano elevate perdite di resa, in particolare nelle zone pianeggianti (Puskas et al., 2012). Nelle zone di passaggio dei macchinari si creano delle depressioni che giocano un ruolo importante nel deflusso superficiale nel caso di elevate precipitazioni. Se essi sono paralleli alla pendenza del campo accelerano l'effetto del runoff e del drenaggio, se invece si trovano in posizione perpendicolare diminuiscono tale effetto (Kiss e Benyhe, 2014);
- l'erosione idrica che, secondo le stime dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, colpisce il 12% della superficie delle terre emerse europee (115 milioni di ettari) e l'erosione prodotta dal vento che invece ne colpisce in maniera grave il 2% (42 milioni di ettari) (Kirkby, 2004). In Italia, il 57% dei terreni agricoli è interessato da fenomeni di erosione compresi tra 0 e 3 t/ha per ogni anno, il 13% presenta fenomeni erosivi compresi tra 3 e 10 t/ha all'anno e sul restante 30% i fenomeni di erosione risultano essere superiori a 10 t/ha ogni anno (Vand der Knijff et al., 2000). Dal 1990 al 2000 si è registrata una riduzione del 9,9% di suoli gestiti dalle aziende agrarie, alla quale si aggiunge una perdita di 892,1 km² di SANU (Superficie Agraria Non Utilizzata) (Iseppi, 2009). Montgomery (2007) afferma che, in media, a livello globale, l'ammontare delle quantità di particelle correlate all'erosione del suolo con i sistemi di agricoltura convenzionale è fino a due volte maggiore rispetto alla capacità di produzione del suolo stesso, con valori che superano 1 mm/anno di terreno eroso. L'erosione del suolo è un fenomeno che provoca un duplice effetto negativo, infatti, oltre ad allontanare un'importante quantità di terreno, porta via anche le particelle più fini e leggere che compongono la frazione più fertile dello strato superficiale. Oltre a ciò, le numerose tecnologie di telerilevamento che permettono di ottenere importanti informazioni topografiche sul territorio non sono ancora ben sviluppate poiché richiedono uno sforzo economico e di tempo che gli organismi regionali e nazionali competenti non sempre sono disposti a svolgere (Ludwig et al., 1995). Una di queste innovative tecnologie è LiDAR che, insieme ai software come

ArcMap, permette di ricreare DTM (Digital Terrain Model) con risoluzione orizzontale fino a 1 m e un'accuratezza verticale di 4,1 cm (Szatmari et al., 2011);

- l'ossidazione della sostanza organica del terreno che comporta una minore stabilità degli aggregati e quindi un peggioramento della struttura del suolo. Con l'aratura, infatti, vengono rapidamente frantumati i macro-aggregati del sottosuolo rendendo la S.O. contenuta in esso più vulnerabile alla decomposizione e mineralizzazione (Six et al., 1998). Il 45% dei suoli europei presenta un contenuto molto scarso di sostanza organica compreso tra lo 0 e il 2%, soprattutto nell'Europa meridionale (Rusco et al., 2001);
- i costi di esecuzione risultano essere molto alti a causa degli elevati consumi di energia, dei numerosi passaggi e ore di lavoro da svolgere, dei vari macchinari da utilizzare, degli eventuali problemi tecnici che possono incombere (Tabella 1.1);

Tabella 1.1 I consumi di energia effettuati per vari tipi di lavorazione (Talarico, 2009)

Sistemi di lavorazione	Potenza trattore [kW/m]	Lavoro [h/ha/m]	Consumo gasolio [kg/ha]	Consumo energetico lavorazione [MJ/ha]
Lavorazione convenzionale con aratura profonda				
Aratura profonda (40 cm)	86	2,08	47	2.191
Estirpatura dopo l'inverno	15	0,26	7	348
Erpicatura con erpice rotante	30	0,53	33	1.503
Semina	13	0,24	6	269
Totale		3,13	93	4.312
Lavorazione minima profonda				
Coltivatore pesante con dischi (35 cm)	36	0,38	25	1.160
Coltivatore leggero combinato	22	0,05	7	353
Semina	16	0,31	9	480
Totale		0,74	93	1.992
Lavorazione minima superficiale				
Diserbo in presemina	5	0,01	2	100
Coltivatore leggero combinato	26	0,06	8	353
Semina	14	0,28	7	351
Totale		0,35	17	803
Semina diretta				
Diserbo in presemina	5	0,01	2	100
Semina diretta	16	0,31	9	480
Totale		0,32	11	579

- il deposito di terra fina negli strati sottosuperficiali causato dal ribaltamento della zolla crea il cosiddetto crostone di lavorazione (Gilley, 1995). I residui organici non decomposti permettono all'acqua piovana di infiltrarsi molto velocemente creando stress idrici e uno strato compatto impermeabile nella zona sottostante al solco arato (Figura 1.1);



Figura 1.1 Il crostone di lavorazione (Talarico, 2009)

- la continua richiesta di fattori produttivi disponibili solamente acquistandoli a costi elevati dal mercato;
- la difficoltà nel creare una corretta e non eccessiva zollosità nel terreno coltivato richiede molte lavorazioni e passaggi di macchine innalzando ulteriormente i costi di produzione e alterando la struttura del suolo;
- la salinizzazione causata dall'accumulo di sali solubili nel suolo come sodio, calcio e magnesio, soprattutto nelle zone costiere. Anche gestioni inappropriate delle risorse idriche e irrigazioni inadeguate possono provocare il suddetto problema;
- la sostituzione di concimi organici con i fertilizzanti minerali crea forti perdite di S.O. nel terreno. Si è passati dall'utilizzo di 14 milioni di tonnellate di fertilizzanti nel 1950 agli attuali 140 (Ciccarese, 2012), di cui solamente la metà vengono assorbiti efficacemente dalle piante poiché il resto viene perso a causa dei fenomeni di lisciviazione, volatilizzazione e ruscellamento superficiale;
- le frane e gli smottamenti provocati dalla mancanza di vegetazione con apparati radicali ben sviluppati, forti pendenze, suoli suscettibili ai fenomeni di erosione, profilo del terreno caratterizzato da strati sottosuperficiali argillosi, precipitazioni intense e abbondanti che non permettono al terreno di assorbirle completamente;
- la perdita di biodiversità dovuta alle continue lavorazioni e all'eliminazione dei pascoli nelle rotazioni che determinano una riduzione della fertilità del terreno. Le specie che venivano coltivate prima della Rivoluzione Verde erano 6000 contro le odierne 200. Inoltre il 70% dell'attuale produzione agraria mondiale è costituito solamente da mais, frumento e riso (Tonelli et al., 2010). I pascoli, oltre ad aumentare l'aerazione del suolo dimezzando i fenomeni di runoff (DeKoff et al., 2011), potrebbero causare alcune problematiche relative al compattamento del suolo calpestato dagli animali con

conseguente minore infiltrazione d'acqua e diminuzione delle rese (Winter e Unger, 2001);

- l'impermeabilizzazione dei terreni causata sia dal materiale impermeabile naturale che ricopre circa il 9% dei terreni europei sia dalle costruzioni artificiali operate dall'uomo per migliorare le condizioni della viabilità, degli edifici e quant'altro;
- l'inquinamento chimico provocato da utilizzi non adeguati dei pesticidi e agrofarmaci per il controllo di malerbe e parassiti. Nella sola Italia, viene distribuito sui campi agricoli il 33% di tutti i pesticidi utilizzati nell'intero territorio europeo (Conselvan, 2013). Gli agrofarmaci creano ulteriori problemi a causa dei residui chimici che permangono sui prodotti finiti e agli effetti indesiderati che colpiscono gli insetti antagonisti naturali utili per la lotta biologica (Mazzon, 2016);
- l'eutrofizzazione causata dagli elevati input di concimi minerali, dall'aumento dei fenomeni di inquinamento localizzato, dal trasporto di nitrati e fosfati al di fuori dei terreni agricoli attraverso runoff (Anonymous, 1999; Wang et al., 2014);
- la perdita di aree a elevato valore naturalistico causata dalla bonifica dei terreni, dal prosciugamento delle zone umide, dalla messa a coltura di terreni marginali non adatti o vulnerabili, dalla conversione dei boschi a pascolo, dalla continua crescita degli allevamenti (Rosa, 2000). Gli effetti causati dall'utilizzo di tecniche agrarie su larga scala comporta anche numerose modifiche sotto l'aspetto geomorfologico del territorio (Toth e Szabo, 2005);
- l'impovertimento delle riserve idriche trattenute dal suolo causato dall'esposizione del terreno all'aria atmosferica.

Tutte queste problematiche hanno comportato notevoli diminuzioni della SAU (Superficie Agraria Utilizzata) nel mondo. Si calcola che ogni anno una superficie di suolo pari alla grandezza dell'Ucraina, cioè 600.000 km² circa, viene persa a causa dell'erosione (Turbè et al., 2010).

Nella zona del Mediterraneo, in particolare, 25 milioni di ettari risultano essere interessati da fenomeni di erosione molto elevati (De Ploey et al., 1991) e il tasso di formazione del suolo di 1.000 kg/ha in Europa non copre i 17.000 kg/ha di perdita di terreno riscontrati da Troeh e Thompson (1993) nelle loro ricerche.

1.3 L'agricoltura conservativa

L'agricoltura moderna è considerata la causa principale di trasformazione del paesaggio, di semplificazione della biodiversità e di inquinamento ambientale (Almagro et al., 2013; Quinton et al., 2008).

Negli ultimi decenni sono state ideate numerose altre tecniche di agricoltura accomunate dalla minima lavorazione necessaria all'ottenimento dei prodotti finali.

L'agricoltura conservativa, detta anche "agricoltura blu", è considerata uno dei metodi per coltivare rispettando l'ambiente. Il termine esclusivo "agricoltura conservativa" è di recente creazione, infatti, è stato coniato nel 2001 durante il Primo Congresso Mondiale sull'Agricoltura Conservativa svoltosi a Madrid. Questa tipologia di agricoltura è stata dapprima adottata negli Stati Uniti, in Argentina, in Brasile e in Australia, per poi avere seguito anche in Europa e Sud Africa.

Con il termine inglese "conservation agriculture", tradotto in italiano con "agricoltura conservativa", s'indica l'insieme delle pratiche agricole volte alla conservazione del suolo, alla protezione delle risorse naturali e alla sostenibilità delle colture utilizzando una gestione integrata degli input esterni, del suolo, dell'acqua e del comparto biologico (Garcia-Torres et al., 2003; FAO, 2008).

Il termine "conservation tillage", "lavorazione del terreno conservativa" in italiano, indica invece un ristretto gruppo di pratiche agricole che riducono il rischio di erosione del suolo e preservano la quantità di acqua presente nel suolo (Mannering e Fenster, 1983). In quest'ultimo caso, si nota lo stretto legame di questo termine con il grado di disturbo del suolo, tuttavia non sono ancora stati ben definiti i parametri numerici per ogni tipologia di tillage, perciò si crea confusione tra i gruppi di agricoltori che sono chiamati a scegliere quale tecnica colturale sia effettivamente la migliore da applicare nella loro azienda. Per questo motivo il conservation tillage non deve essere confuso con la conservation agriculture, ma può essere considerato una fase di transizione attraverso la quale il singolo agricoltore può raggiungere gli obiettivi generali previsti dall'adozione dell'agricoltura conservativa con i conseguenti miglioramenti del contesto agrario, paesaggistico, ambientale e sociale (Stagnari et al., 2010).

L'agricoltura conservativa, così chiamata perché ha l'obiettivo di conservare il suolo, è un modello di agricoltura in cui almeno il 30% della superficie totale rimane coperto permanentemente da residui colturali o cover crops, il terreno stesso è sottoposto a tecniche di non lavorazione o minima lavorazione senza l'inversione degli strati del suolo ed è prevista l'adozione di consociazioni, nel caso di colture perenni, e rotazioni colturali diversificate, nel

caso di colture annuali, inoltre viene usata una gestione integrata dei prodotti fitosanitari (Soil Science Glossary Terms Committee, 2008; FAO, 2013).

Le cover crops sono utilizzate come colture intercalari fra quelle principali e provvedono a migliorare la qualità del suolo perché hanno capacità azoto-fissatrici e repellenti per i parassiti, per di più consentono al terreno di ricreare la situazione di porosità originale.

La lignina che viene lasciata sul terreno con i residui colturali è di fondamentale importanza nel ciclo del carbonio perché, dalla sua decomposizione, si può ottenere humus. La trasformazione degli aldeidi e degli acidi fenolici della lignina in chinoni avviene grazie all'azione enzimatica dei microrganismi. I chinoni vengono poi polimerizzati e costituiscono delle macromolecole organiche che daranno origine alla sostanza umica (Stevenson, 1982).

La rotazione delle colture permette alle radici di esplorare varie profondità del terreno usufruendo dei nutrienti che si trovano nei vari strati e consente lo sviluppo di fauna e flora terricola di diverse specie (FAO, 2012), interrompe le infezioni tipiche delle monocolture e previene lo sviluppo delle malerbe attraverso alcune interazioni chimico-fisiche tra le piante, come l'allelopatia (Catizone e Zanin, 2002).

Le principali innovazioni che continuano a portare benefici all'adozione dell'agricoltura conservativa riguardano vari ambiti quali la meccanica, la chimica, la fisica, la genetica, l'economia, l'ambiente e l'agronomia in generale. Questo tipo di agricoltura concilia tutte le conoscenze originate dalle ricerche scientifiche per sfruttare in maniera sostenibile le risorse naturali al fine di limitare fortemente i fenomeni di inquinamento locale.

L'agricoltura conservativa è un insieme di pratiche complementari ed eco-compatibili che, attraverso una gestione sostenibile e integrata delle risorse (suolo, acqua, vegetazione, energia), permette di ottenere un prodotto finito (cibo, alimenti zootecnici, fibre, materiali vari, biomasse, ecc.) di buona qualità con un minor impatto sulle componenti ambientali, economiche e sociali (Pisante, 2013; Baker et al., 2002).

Nel 2005, venivano coltivati, a livello globale, oltre 95 milioni di ettari utilizzando tecniche conservative (Derpsch, 2005), nel 2008 furono raggiunti i 105 milioni di ettari corrispondenti allo 0,07% delle superfici agricole mondiali (Derpsch e Theodor, 2008). La maggior parte di essi è situato in America (FAO, 2001). Le superfici agrarie conservative stanno aumentando anche a livello europeo poiché presentano numerosi vantaggi a causa della loro multifunzionalità.

Gli aspetti che caratterizzano la multifunzionalità dell'agricoltura non sono direttamente parte del ciclo di produzione, ma si riferiscono all'impatto ambientale, alla biodiversità, al paesaggio, alle tradizioni locali, all'eco-sostenibilità, alla sicurezza alimentare, alla salubrità delle derrate, alle pratiche di gestione agronomica, allo sviluppo delle aree rurali, alle attività economiche correlate (Nomisma, 2005).

Nel 2020 è previsto un utilizzo delle tecniche conservative sul 75% dei campi negli USA, sul 50% dei terreni negli altri stati sviluppati e sul 25% dei suoli agricoli nelle nazioni in via di sviluppo (Lal, 1998).

Anche nelle regioni tropicali e semiaride del pianeta questa tipologia agraria sta riscontrando molto interesse (Lal, 2000).

In Europa, questo tipo di agricoltura ha conosciuto solamente negli ultimi anni l'importanza della gestione sostenibile del suolo coltivabile e ha iniziato a sviluppare queste tecniche di agricoltura fino al raggiungimento dell'attuale 15% dei terreni agricoli coltivati (Jones et al., 2006).

Nella Tabella 1.2 sono riportate le superfici di alcune nazioni europee dedicate all'agricoltura no-tillage.

Tabella 1.2 Le superfici dedicate al no-tillage in alcune nazioni europee (Soane et al., 2012)

Country	Area of no-till (kha)	Total arable land (2008) (kha)	Area of no-till as % of total arable area
Finland	200	2256	8.86
Germany	5	11933	0.42
France	200	18260	1.09
Switzerland ^c	12.5	408	3.06
Spain	650	12500	5.20
Portugal	80	1050	7.62
Italy	80	7132	1.12
Slovak Rep.	37	1382	2.68

I principali vantaggi che l'adozione delle lavorazioni conservative comporta ai suoli agrari sono:

- il sequestro di C nel terreno risulta elevato con l'aumento della sostanza organica nel suolo. Si stima che la lavorazione di tipo conservativo può conservare fino a 23,8 kg/ha di C all'anno (Kern e Johnson, 1993) e la conservazione di S.O. in un suolo lavorato con tecniche conservative arrivi a essere 1,8 volte maggiore rispetto a uno lavorato convenzionalmente (Dendooven et al., 2012);
- la protezione dei terreni dall'erosione dell'acqua (Carter e Steed, 1992) e del vento. I residui colturali lasciati sulla superficie annullano l'energia cinetica e potenziale delle gocce d'acqua impedendo che si crei un'erosione laminare e il cosiddetto "effetto splash", cioè il sollevamento di corpuscoli di suolo causato dall'impatto della goccia sul terreno. I residui vegetali fanno sì che venga fortemente limitata l'erosione eolica poiché

formano uno strato protettivo che riduce la velocità del vento a contatto con la superficie (Giardini, 2002). Kurote et al. (2014) hanno dimostrato che nelle lavorazioni convenzionali si ottiene una concentrazione massima di sedimenti erosi con runoff equivalente a 22,9 g/l contro i soli 10,2 g/l della non lavorazione;

- la riduzione dei fenomeni di ruscellamento superficiale può raggiungere elevate percentuali, fino all'89% rispetto ai sistemi convenzionali (Baker e Laflen, 1983, Fawcett et al., 1994). L'efficacia nella riduzione del runoff con agricoltura zero-tillage è migliore nei casi di terreni con pendenze moderate comprese tra il 5 e il 10% con un contenuto di argilla nel suolo minore del 33% (Sun et al., 2015);
- l'impiego accurato di fertilizzanti e prodotti fitosanitari che vengono rilasciati nei giusti periodi, con le corrette dosi, secondo le modalità di somministrazione previste dalla legge, minimizzando l'influenza sui processi biologici naturali (Smith et al., 2007);
- il minor inquinamento delle acque superficiali (fiumi, laghi, ecc.) con sedimenti o agrofarmaci trasportati dalle piogge non percolate, anche se bisogna tener conto di un aumento delle quantità di diserbanti trasportati con le acque per infiltrazione nei macropori (Ogden et al., 1999; Potter et al., 2015). Clausen et al. (1996) hanno dimostrato che l'adozione delle tecniche conservative diminuisce del 90% la perdita di atrazina e dell'80% quella di cianazina. Le concentrazioni delle perdite di nitrati, sostanze ammoniacali e fosfati nelle acque di ruscellamento superficiale sono minori nel no-tillage, intermedie nel caso di chisel-plow tillage e maggiori nelle tecniche convenzionali (Seta et al., 1993);
- la trasformazione in prodotti meno tossici degli agrofarmaci che si infiltrano nel terreno e vengono a contatto con la S.O. in stretto legame con i macro-pori generati dai lombrichi (Stehouwer et al., 1994). Il destino delle molecole degli agrofarmaci non è ben prevedibile poiché affetto da molteplici fattori come le proprietà del terreno, le caratteristiche chimico-fisiche del prodotto, la quantità di residui colturali in grado di assorbire il fitofarmaco (Sadeghi e Isensee, 1997);
- il compattamento del suolo è evitato grazie alla riduzione del traffico dei macchinari agricoli perché le lavorazioni meccaniche sono ridotte al minimo sia per quantità che per intensità;
- il contenuto idrico nel sottosuolo viene conservato e i fenomeni di siccità vengono ridotti grazie all'aumento dell'assorbimento di acqua nel sottosuolo (Unger et al., 1991), alla maggiore ritenzione idrica (Kay e VandenBygaart, 2002) e alla conservazione di acqua con una tensione superficiale ottimale e prontamente utilizzabile dalle piante (Stewart, 2007). Secondo Whitmore e Whalley (2009), il problema principale causato dalle

condizioni di siccità non è solamente la mancanza d'acqua nel sottosuolo, bensì la durezza superficiale del suolo;

- i costi di produzione sono fortemente ridotti perché la minima o nulla lavorazione necessaria per la preparazione del letto di semina e la sarchiatura fanno risparmiare l'agricoltore. I costi diminuiscono di circa il 30-40% dopo alcuni anni dalla conversione di un terreno coltivato con agricoltura convenzionale a conservativa per il minor uso di carburante, l'uso minimale dei macchinari, la riduzione della manodopera (FAO, 2012);
- la minore perdita di elementi nutritivi (Skoien, 1988) causata anche dalla fissazione biologica dell'azoto grazie ai microrganismi presenti nel sottosuolo;
- la minore emissione di gas serra evita di arrecare ulteriori danni al clima (West e Marland, 2002). Il passaggio di tutti i terreni agricoli europei alle tecniche di no-tillage dovrebbe riuscire ad azzerare tutte le emissioni di CO₂ originate da combustibile fossile in agricoltura (Smith et al., 1998). Al-Kaisi e Yin (2005) hanno dimostrato che l'adozione di tecniche conservative può ridurre fino al 24% delle emissioni di anidride carbonica. Secondo la FAO (2008), l'agricoltura conservativa permette di ridurre l'impiego di carburanti del 70%. L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha proposto l'adozione di biocarburanti e metodi che permettono di sequestrare il carbonio nel terreno per limitare le emissioni di gas serra prodotti dall'agricoltura. L'accumulo di carbonio nel suolo può produrre importanti benefici agronomici, ambientali e sociali a scala globale (Pisante, 2007);
- l'aumento della biodiversità e dell'attività biologica del suolo a causa della fauna terricola che si arricchisce migliorando il riciclo delle sostanze nutrienti e la macroporosità del terreno. La fauna terricola viene suddivisa in 3 gruppi da Lavelle (1997): i microorganismi come batteri, micorrize, protozoi e nematodi che sono adibiti al riciclaggio dei nutrienti e si nutrono di residui organici con basso peso molecolare; la mesofauna costituita dagli enchytraeidae, collemboli, acari, proturi e dipluri che migliorano la struttura del terreno creando degli aggregati, favoriscono il riciclo degli elementi nutritivi e si cibano di funghi e di particelle decomposte o si comportano da predatori; la macrofauna composta dai gasteropodi, lumbricidae, aracnidi, isopodi, miriapodi, ditteri, coleotteri e lepidotteri che sono in grado di spostare il terreno e modificarne la porosità favorendo gli scambi idrici e gassosi, inoltre si alimentano con il substrato del terreno, la microflora, la microfauna e la sostanza organica (House e Parmelee, 2005). La capacità cementante degli escrementi dei lombrichi diminuisce il rischio di erosione (Arden-Clarke e Hodges, 1987; Davidson et al., 2002). Il numero di lombrichi presenti in aree interessate da agricoltura conservativa è risultato essere sei

volte superiore rispetto alle aree con tecniche agricole convenzionali (Wuest, 2001). Le quantità di carbonio e azoto utilizzati dalla biomassa microbica nei terreni lavorati da più di 10 anni con tecniche conservative sono superiori, in media, del 25% rispetto ai suoli lavorati con agricoltura convenzionale (Gajda et al., 2013);

- l'acidificazione del suolo causata dall'impiego di fertilizzanti con azoto comporta una riduzione del pH seguita dalla variazione della disponibilità di alcuni importanti elementi chimici presenti nel suolo. Si nota un aumento delle quantità di alluminio e manganese scambiabili, al contrario della riduzione di calcio e di magnesio disponibili per le piante. Il potassio e il magnesio sono prevalentemente concentrati tra gli 0 e i 5 cm di profondità (Blevins et al., 1983). Il fosforo viene perso tramite runoff nei terreni conservativi in quantità duplice rispetto ai suoli trattati con sistemi convenzionali (Gaynor e Findlay, 1995);
- la struttura e la stabilità del terreno sono migliorate anche grazie alla formazione di uno strato di compost dovuto all'accumulo dei residui colturali e che permette di mantenere la temperatura e l'umidità idonee nei primi centimetri di suolo (Paul et al., 2013);
- la riduzione dell'intervallo di tempo tra raccolta e semina con la possibilità di avvicinare più colture durante l'anno sullo stesso appezzamento di terreno.

Le tecniche di agricoltura conservativa sono molteplici (Figura 1.2) e possono essere suddivise in base alle loro caratteristiche principali in:

- Ridge-tillage che riduce il fenomeno dell'erosione del suolo causata da acqua e aria fino a valori del 70%. Prevede la creazione di file larghe 45 cm con un'altezza di 15 cm nella parte centrale dove vengono coltivate le colture. Alla base di questi innalzamenti si trova una zona di terreno lasciata completamente indisturbata;
- Mulch-tillage che utilizza la tecnica del mulching o pacciamatura e prevede la formazione di uno strato di materia organica vegetale permanente sparsa sul terreno e lasciata su di esso per tutto il periodo di impegno. In questo modo viene ridotta l'erosione del suolo causata da deflusso superficiale, si riduce l'evaporazione di acqua dal terreno, è aumentata la capacità di trattenere l'umidità negli strati sottosuperficiali, si accresce il volume di materia organica contenuta nel terreno, viene dissipata l'energia potenziale delle gocce piovane, si migliora la struttura del suolo e viene minimizzata la ricrescita delle malerbe se la pacciamatura è molto densa (Srivastava et al., 1993). Secondo Cerdà e Doerr (2008), la minima percentuale di pacciamatura che deve essere lasciata sul suolo per ottenere delle significative riduzioni di runoff è del 60%. I principali materiali

utilizzati per la pacciamatura del terreno devono avere bassi costi, elevata disponibilità, resistenza agli eventi atmosferici, effettiva applicabilità, lunga permanenza al suolo e possono essere formati da paglia, canna da zucchero, paglia di riso, paglia di orzo, residui di potatura integri o tritati (Youlton et al., 2016; Prosdocimi et al., 2016);

- Strip-tillage che consente di effettuare delle lavorazioni lungo le linee di semina con varie larghezze e profondità, lasciando indisturbati gli spazi tra le file;
- Chisel-plow tillage che permette di utilizzare attrezzature dentate rigide o morbide per operare a una profondità massima di 10-15 cm con l'obiettivo di rimescolare il suolo, lasciando una parte dei residui colturali sulla superficie. In alcuni casi possono essere utilizzati dei dischi pesanti con dissodatori che penetrano fino a 38 cm nel terreno e permettono di tagliare anche le parti dei residui nel sottosuolo ridistribuendole in superficie;
- Minima lavorazione profonda che risulta essere molto utile nel momento in cui l'agricoltore decide di passare dall'utilizzo di tecniche convenzionali a quelle conservative. Questa lavorazione richiede meno energia dell'aratura riuscendo comunque a decompattare il suolo senza invertire gli strati del terreno, aumentando la macroporosità e lasciando in superficie più del 40% dei residui colturali;
- Minima lavorazione superficiale, minimum tillage o reduced tillage che viene considerata la migliore tecnica conservativa da quegli agricoltori che stanno eseguendo la transizione da lavorazioni convenzionali a conservative. In questo caso viene lavorata solamente la parte superficiale del terreno rendendolo adatto alla coltivazione e contrastando l'insorgere di piante infestanti con l'utilizzo di attrezzature come denti metallici o dischi. Per di più, il terreno che subisce minima lavorazione superficiale permette di avere una più facile fase di semina rispetto alla semina su sodo perché il suolo non è compatto o coperto da molti residui;
- Semina su sodo, semina diretta, no-tillage o zero-tillage che consente all'agricoltore di poter ricavare i prodotti finali senza alterare intensamente il terreno, senza preparazione del letto di semina e sfruttando i benefici forniti dai processi naturali che mantengono la fertilità nel tempo. Il no-tillage riduce fino al 90% dell'erosione. Particolare attenzione bisogna dare alla completa copertura del seme, alla profondità di semina, alla distanza di semina tra le file e sulla fila, alla compressione del terreno sulla linea di semina durante le lavorazioni. Questa tecnica richiede almeno un intervento di diserbo aggiuntivo necessario per il controllo delle numerose infestanti. Al contrario della tecnica di minimum tillage che prevede il disturbo di tutta la superficie agricola, nel no-tillage i semi sono piantati direttamente nel terreno dove sono stati lasciati i residui colturali delle

colture precedenti (Gajri et al., 2002). Attualmente, il 7% dei terreni agricoli mondiali, corrispondenti a 100 milioni di ettari, adotta sistemi di no-tillage, l'85% di questi è situato in America. In Italia soltanto l'1% delle superfici agricole utilizza questa tecnica (Marandola, 2010);

- Altre tecniche come l'impiego delle cover crops o la lavorazione delle stoppie.

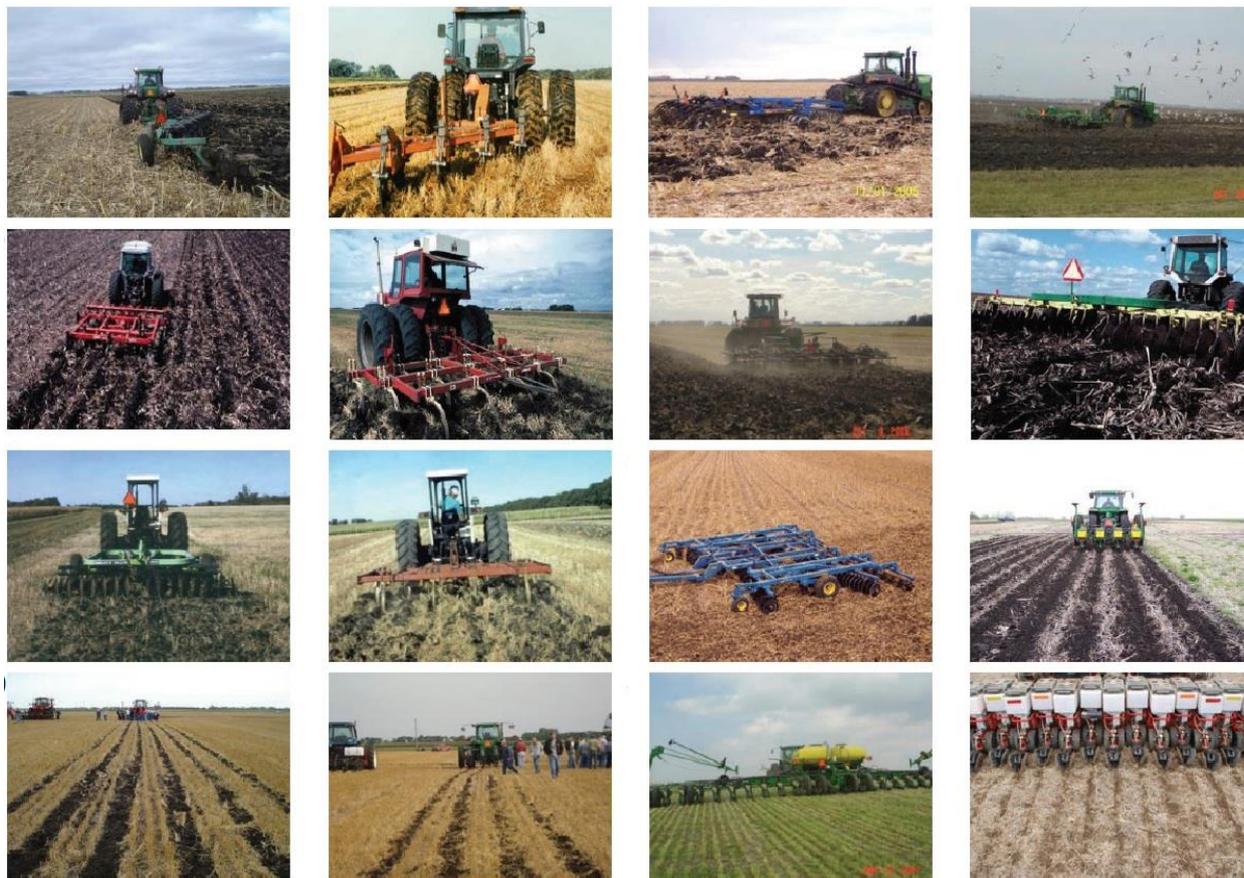


Figura 1.2 Alcune tecniche di conservation tillage (Don C. Reicosky, 2015)

La conversione di un campo agrario lavorato con tecniche intensive a uno di tipo conservativo richiede quattro fasi fondamentali che possono durare due o più anni.

La prima fase prevede l'interruzione delle arature con il deposito di residui colturali su almeno un terzo della superficie e l'introduzione di cover crops intercalari dopo il raccolto della coltura principale. La seconda fase di transizione richiede un controllo efficace sulle infestanti e i parassiti, si nota anche un aumento della sostanza organica originata dalla decomposizione dei residui con un conseguente miglioramento delle condizioni di fertilità del suolo. Durante il terzo stadio possono essere introdotte le rotazioni colturali e il sistema si stabilizza gradualmente. Nell'ultima fase, il sistema raggiunge un equilibrio perciò gli interventi con fitofarmaci e fertilizzanti possono essere ridotti e si possono ottenere rese superiori rispetto all'agricoltura tradizionale (Tonin, 2012). Le produzioni agricole possono risultare inferiori rispetto alla media

nei primi anni di assestamento del sistema conservativo, tuttavia è stato dimostrato che le rese effettive sono uguali o addirittura superiori rispetto alle tecniche convenzionali precedentemente utilizzate a partire dai cinque anni successivi alla fase di transizione (Kladivko et al., 2003).

Con le tecniche conservative, il terreno è meno disturbato e la quantità di sostanza organica contenuta nel suolo risulta maggiore dal terzo anno di adozione di tali tecniche (Bono, 2012). Deen e Katakai (2003) hanno dimostrato che l'aumento di sostanza organica nel suolo è visibile solamente negli strati superficiali a diverse profondità secondo la tecnica di minima lavorazione utilizzata. Per il no-tillage, la quantità di S.O. aumenta da 0 a 5 cm di profondità, mentre con il chisel-plow tillage l'aumento si nota da 5 a 10 cm di profondità. Dai 15 cm in giù, infatti, la quantità di S.O. nel terreno non presenta differenze significative a seconda della tecnica conservativa utilizzata, come dimostrato da Ken e Johnson (1993).

Per quanto riguarda la stabilità strutturale del suolo, si sono osservati dei miglioramenti già dal primo anno di adozione di tali pratiche (Tabaglio et al., 2008). Non bisogna quindi attendersi dei rilevanti miglioramenti nel breve periodo, ma si possono riscontrare delle variazioni evidenti e significative del contenuto di carbonio e azoto organico in grado di regolare il tasso di mineralizzazione e l'attività microbica nel terreno con il passare di alcuni anni (Gregorich et al., 1994).

Gli eventi piovosi, sempre più abbondanti e violenti negli ultimi anni, spesso alterano le condizioni chimico-fisiche del suolo utili alla coltivazione (Olborn et al., 2000).

Lo stato di tempera è una condizione in cui nel terreno si trova un corretto grado di umidità per il quale, durante le lavorazioni, non vengono danneggiati né i suoli né i macchinari utilizzati. Questa situazione è necessaria prima di qualsiasi tipo di lavorazione, sia essa convenzionale o conservativa, poiché altrimenti si avrebbero situazioni con compattamento del terreno, aumento dei fenomeni di ruscellamento, minima infiltrazione idrica, danneggiamento alla struttura del suolo, rese inferiori, stress idrici (Ferrerias et al., 2000).

Nel 1999 è nata l'ECAF, European Conservation Agriculture Federation, un'associazione no-profit con il compito di evidenziare gli svantaggi delle tecniche convenzionali e favorire l'adozione di quelle conservative nel territorio europeo. Essa promuove uno scambio di conoscenze fra le 15 istituzioni nazionali associate (ECAF, 2001). Per l'Italia l'istituzione di riferimento è AIGACoS (Associazione Italiana per la Gestione Agronomica e Conserviera del Suolo) fondata nel 1998 per sostenere le sperimentazioni, le ricerche, gli incontri tecnici e la divulgazione dei vantaggi associati all'adozione dell'agricoltura blu.

Dal punto di vista economico si può notare che, sebbene le tecniche di agricoltura conservativa possiedano molte esternalità ambientali positive di interesse pubblico, l'agricoltore fonda la scelta dell'utilizzo di tali tecniche sul fatto che gli aspetti gestionali e agronomici abbiano un

peso inferiore sul conto finale delle spese sostenute. Gli aspetti economici da valutare quando si decide di adottare una tecnica conservativa sono molteplici e spaziano dalla maggiore pressione della flora infestante al molteplice ricorso al diserbo, dalle miglorie ambientali complessive alle variazioni di resa delle colture, dai minori costi di lavorazione alla necessità di manodopera qualificata e informata sulle giuste tempistiche da rispettare per ogni fase di produzione. I costi di produzione sono molto ridotti a causa delle minori lavorazioni del suolo richieste per le attività conservative, ciò nonostante è necessario un ingente investimento iniziale per il rinnovamento del parco macchine e la formazione professionale degli operatori con relativi costi che incombono sul bilancio finale. Un esempio può essere la fase di semina che, nel caso di tecniche conservative, comporta una maggiore quantità di seme utilizzata (+10%) e un maggior costo della nuova seminatrice specializzata (+30%) (Talarico, 2009).

In merito al diserbo, è stato calcolato che nell'agricoltura conservativa è necessario un suo rafforzamento eseguibile attraverso un intervento supplementare durante la fase di pre-semina ed eventuali altri in fase di post-emergenza con maggiori costi influenzati dalla scelta del principio attivo da utilizzare, dai macchinari da usare, dal carburante da consumare e dalle tempistiche di distribuzione. Tuttavia, si deve considerare che gli interventi con erbicidi e fitofarmaci sono necessari quasi esclusivamente solo nei primi anni di coltura conservativa quando le infestazioni di malerbe e parassiti creano perdite di raccolto non sostenibili (FAO, 2012).

Il glifosate è l'erbicida più utilizzato nei sistemi di agricoltura conservativa a causa della sua bassa eco-tossicità (During e Hummel, 1997). Introdotto in agricoltura a partire dal 1971, ha portato molti vantaggi nel controllo delle malerbe, nondimeno, negli ultimi anni, la sua efficacia sta diminuendo a causa delle sempre più frequenti e abbondanti piogge che richiedono ulteriori interventi fitosanitari con diversi altri erbicidi. Talvolta sono necessari anche degli interventi con fungicidi in quanto i patogeni permangono sui residui lasciati a terra portando malattie su radici, semi e foglie che alterano così la qualità del prodotto finale (Mikkola et al., 2005).

Gli elevati costi sostenuti dalle aziende agrarie e le perdite di resa delle colture dovute alla presenza di piante infestanti sono la principale causa di danno economico a livello mondiale tale da costituire un deterrente per molti agricoltori.

Il controllo delle malerbe in un sistema convenzionale è effettuato tramite l'uso di erbicidi e lavorazioni che, operando in modo sinergico, permettono di mantenere la densità delle infestanti sotto il livello soglia del danno economico. Questo non può essere effettuato per un sistema agrario di tipo conservativo, perciò è necessario aumentare il controllo chimico delle malerbe con conseguenti impatti sui costi aziendali, sull'ambiente e sulla salute (Builled et al., 2012).

Nel mondo agrario, si sta osservando un calo nella disponibilità di prodotti selettivi per il controllo chimico delle infestanti e un progressivo aumento della resistenza agli erbicidi. In

questo modo aumentano i problemi causati dalle malerbe sulle colture principali che sono costrette a competere per spazio, acqua, nutrienti e luce.

La scelta del timing delle operazioni di diserbo ha un'importante influenza sull'efficacia del trattamento che, se effettuato troppo presto o troppo tardi rispetto al periodo di competizione delle malerbe con le colture principali, provoca un aumento incontrollato della densità dell'infestazione nel campo agricolo (Swanton e Murphy, 1996). Un modo per alleviare questo problema è rappresentato dall'adozione di strumenti informatici, come AlertInf (Masin et al., 2012), che permettono di costruire modelli previsionali della dinamica di emergenza delle piante infestanti fornendo importanti dati utili alla gestione dei tempi di applicazione, delle modalità di diffusione, dei periodi di realizzazione e della convenienza economica dell'intervento di controllo (Harker e O'Donovan, 2013). Il sistema informatico AlertInf, in particolare, permette di effettuare i trattamenti fitosanitari in base al periodo di emergenza delle malerbe principali del mais nel Nord Italia influenzato dal "tempo idrotermico", una variabile differente per ogni specie di infestante e che tiene conto della temperatura e del potenziale idrico del suolo utili alla maturazione dei semi (Gasparini, 2014).

I fattori fondamentali che influenzano la germinazione dei semi e l'emergenza delle piante infestanti sono la profondità di interrimento, la dimensione del seme, la luce (Ballaré et al., 1992), il contenuto di umidità nel suolo (Roberts e Potter, 1985), la temperatura (Benvenuti e Macchia, 1993), il pH del terreno, il compattamento del suolo (Pareja e Staniforth, 1985), la presenza di vento, l'attività microbiologica (Nandula et al., 2006), le condizioni microclimatiche del territorio, il numero di anni in cui sono state praticate specifiche tecniche agrarie. Questo elenco di fattori, indica che nelle tecniche di agricoltura conservativa, in cui non c'è alcun tipo di ribaltamento del suolo, i semi rimangono negli strati superficiali del terreno e sembra che siano i semi più piccoli a beneficiare di questa situazione e a trovare le condizioni favorevoli per la germinazione (Garcia et al., 2013). Per di più, alcuni autori hanno dimostrato che i semi di piccola taglia lasciati sulla superficie possono essere facilmente trasportati dal vento aumentandone la disseminazione e costringendo l'agricoltore a ricorrere all'impiego di ulteriori trattamenti chimici (Swanton et al., 1999; Torrensen e Skuterud, 2002).

Come detto sopra, l'agricoltura conservativa che segue la tecnica della non lavorazione (semina su sodo) è fortemente dipendente dall'uso del glifosate per disseccare la cover crop o per pulire il letto di semina dalle malerbe. Un numero elevato di trattamenti ripetuti con lo stesso principio attivo provoca fenomeni di resistenza agli erbicidi nelle varie popolazioni di piante infestanti. Perciò risulta fondamentale un buon controllo nei primi anni di conversione per non dover poi abusare dell'uso di questo erbicida che ha attualmente pochi prodotti alternativi sul mercato.

Non tutti i terreni possono accogliere le minime lavorazioni. Queste, inoltre, richiedono una tenacia e delle competenze superiori a quelle richieste dall'agricoltura di tipo convenzionale. Molti agricoltori sono preoccupati dagli elevati costi iniziali che il processo di transizione da agricoltura convenzionale a conservativa richiede. L'acquisto di attrezzatura specializzata, il rinnovamento del parco macchine aziendale, l'eventuale ricorso a controterzisti e la dismissione dei macchinari inutilizzati frenano il ricorso alle tecniche conservative, in particolar modo nelle aziende con superfici medie o piccole e a conduzione familiare. Tuttavia, Tebrugge (2001) ha dimostrato che l'investimento necessario per l'acquisto dei macchinari utilizzati nell'agricoltura convenzionale equivale a 1,63 volte quello richiesto per il no-tillage, i costi di manutenzione sono 4 volte superiori, il carburante comporta una spesa fino a 6,5 volte maggiore e le ore di lavoro necessarie sono circa il quintuplo.

Secondo Pisante (2007), le colture principali della Pianura Padana, come mais e grano tenero, porteranno notevoli benefici economici alle aziende che decideranno di abbandonare le tecniche convenzionali e di adottare quelle conservative. Infatti, per un'azienda che coltiva mais nel Nord Est, i costi risulteranno inferiori del 4% se adotterà la tecnica della minima lavorazione e dell'11% nel caso di adozione della semina su sodo; invece, per le colture di grano tenero, la riduzione dei costi ammonta al 3% per la minima lavorazione e al 9% per la semina diretta (Talarico, 2009).

Nell'ambito della salvaguardia del pianeta e delle risorse strettamente legate all'insostenibile situazione che si è registrata negli ultimi anni nel settore primario, l'Unione Europea, attraverso la PAC (Politica Agricola Comunitaria), ha rilevato la necessità di regolare il lavoro agricolo in modo da creare un nuovo equilibrio eco-compatibile con le esigenze del mercato. La PAC fonda i suoi principi cardine sulla ricerca di un'agricoltura più "green" attenta alla tutela ambientale e alle pratiche agricole di basso impatto.

Nella PAC del 1992 sono stati creati anche i Codici delle Buone Pratiche Agricole, una sorta di linee guida che gli agricoltori sono tenuti a seguire per ridurre l'impatto ambientale causato dalle principali fasi della coltivazione.

A partire dal 2014, si è focalizzata l'attenzione sul 2° pilastro della PAC, aumentando l'impegno finanziario da diffondere agli stati membri attraverso l'attuazione del PSR (Programma di Sviluppo Rurale) a livello regionale. Nel documento "Europa 2020: una strategia per la crescita intelligente, sostenibile e inclusiva", l'UE s'impegna a programmare una gestione sostenibile della produzione alimentare e delle risorse naturali volta alla redditività delle produzioni, alla competitività del settore agrario, alla mitigazione dei cambiamenti climatici, alla generazione di esternalità positive, alla produzione di beni pubblici, allo sviluppo delle aree rurali (Commissione UE, 2010). La Commissione Europea ha finanziato un progetto denominato

KASSA (Knowledge Assessment and Sharing on Sustainable Agriculture) con lo scopo di analizzare tutti i risultati ottenuti dalle ricerche scientifiche relative all'utilizzo dell'agricoltura conservativa svolte finora (Lahamar, 2010). In Italia, la prima regione ad accorgersi delle potenzialità dell'agricoltura blu e dell'importanza degli aiuti economici agli agricoltori che intendono adottare sistemi conservativi, è stata il Veneto, seguita poi dal Friuli Venezia Giulia. La Regione Veneto, grazie a Veneto Agricoltura, ha avviato un progetto denominato MONITAMB 214/I, il quale, attraverso l'Asse 2 del PSR del 2007-2013, Misura 214 "Pagamenti agro-ambientali" sottomisura I "Gestione ecocompatibile delle superfici agricole", prevede l'istituzione di un fondo di aiuti economici diretti agli agricoltori che impiegano tecniche volte alla tutela dell'ambiente, del territorio, del paesaggio e delle risorse naturali.

La misura 214/I del PSR Veneto consiste in due tipi di applicazione: l'Azione 1 che prevede l'adozione di tecniche di agricoltura conservativa e l'Azione 2 che invece fa riferimento alle tecniche di copertura continuativa del suolo. Sia per l'Azione 1 che per l'Azione 2 il periodo di applicazione è di 5 anni dalla presentazione della domanda di adesione.

L'Azione 1 ha l'obiettivo di ridurre le perdite di carbonio organico nei campi coltivati a seminativo, ridurre le emissioni di anidride carbonica in atmosfera e aumentare la biodiversità presente nel terreno. Gli agricoltori che fanno domanda per aderire al perseguimento di tali obiettivi s'impegnano a rispettare diverse regole per poter ottenere l'aiuto economico per il quale hanno fatto richiesta: impiegare le pratiche conservative su almeno il 25% della superficie seminativa aziendale, applicare specifiche successioni colturali, non usare arature, sfruttare esclusivamente le tecniche di semina su sodo, trinciare i residui colturali secondo la tecnica del mulching che prevede la formazione di uno strato di materiale vegetale permanente sparso sul terreno, garantire la copertura continuativa del suolo, somministrare azoto e fosforo in dosi frazionate e ben localizzate, ridurre al minimo e con la massima efficacia gli interventi per il controllo delle malerbe, effettuare l'analisi chimico-fisica annuale dei terreni sottoposti a impegno riportandola nel registro degli interventi colturali che dovrà essere redatto almeno una volta al mese, insieme anche alla coltura seminativa principale, agli erbai primaverili-estivi, alle cover crops utilizzate, alle date di semina, quelle di fertilizzazione, ai trattamenti effettuati con prodotti fitosanitari e antiparassitari, ai giorni dedicati alla devitalizzazione delle colture di copertura con principi attivi dissecanti totali.

Le altre norme da rispettare se si accetta l'Azione 1 della misura 214/I del PSR Veneto sono: i Criteri di Gestione Obbligatoria (Atti) e le Buone Condizioni Agronomiche e Ambientali di Condizionalità (Norme e Standard) espressi negli art. 5 e 6 e negli Allegati II e III del Regolamento CE n° 73 del 2009, in particolare si fa riferimento all'Atto A4 cioè la Direttiva 91/676/CEE inerente alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati

provenienti dalle fonti agricole, allo Standard 1.1 relativo alla gestione minima delle terre che rispetti le condizioni locali specifiche, allo Standard 1.2 legato alla copertura minima del suolo, allo Standard 2.2 in cui si trovano le modalità per l'avvicendamento delle colture.

Nelle aziende agrarie che s'impegnano ad adottare l'Azione 1 è vietato fare uso di fanghi di depurazione, di residui non tossici e nocivi, di fertilizzanti, di diserbo, di asportazione delle cover crops, di qualsiasi tipo di aratura, erpicatura, estirpatura, sarchiatura, di semina del mais per due anni consecutivi.

Solo in alcuni casi eccezionali in cui le condizioni pedoclimatiche sono sfavorevoli a causa di episodi di eccessivo compattamento del suolo, abbondanti fenomeni di ristagno, anossia radicale, l'agricoltore può avvisare l'AVEPA (Agenzia Veneta per i Pagamenti in Agricoltura) che, a sua volta, informa la Regione e autorizza l'adozione di tecniche di minima lavorazione profonda utilizzando decompattatori.

L'importo massimo del premio per l'Azione 1 è di 481 €/ha all'anno in terreni di pianura e 435 €/ha all'anno in collina.

L'azione 2 promuove l'adozione delle rotazioni colturali per diminuire la concentrazione di nitrati nelle acque di falda e superficiali del territorio veneto attraverso la riduzione dei fenomeni di percolazione e dilavamento dei composti azotati e fosfatici. Quest'azione ha l'obiettivo di far mantenere una continua copertura della superficie grazie all'alternanza delle colture seminative con cover crops di graminacee autunno-vernine ed erbai primaverili-estivi. L'agricoltore che vuole ottenere i benefici economici regionali previsti, 302 €/ha all'anno, deve: adottare pratiche colturali opportune su almeno il 25% della superficie seminativa aziendale, utilizzare successioni colturali specifiche, usare colture principali previste dall'Azione 2 (mais, sorgo, soia, cereali autunno-vernini, colza, barbabietola da zucchero, foraggio, colture erbacee autunno-vernine), coltivare cereali autunno-vernini o piante crucifere o erbai primaverili-estivi per almeno 2 anni dei 5 totali di impegno, seminare cover crops per almeno 3 anni dei 5 totali di impegno in successione alle colture principali, non rilasciare alcun prodotto fitosanitario o fertilizzante sulle cover crops, eseguire il sovescio delle colture di copertura prima di seminare la coltura principale, effettuare con cadenza annuale le analisi chimico-fisiche del terreno e riportarle sul registro degli interventi colturali da tenere con la massima cura aggiornandolo mensilmente.

Anche per gli agricoltori che scelgono di impegnarsi nell'Azione 2 valgono alcune precise proibizioni come l'assoluto divieto di utilizzo dei fanghi di depurazione o residui non tossici e nocivi, di fertilizzanti organici e chimici, di diserbare, di uso dei prodotti fitosanitari, di asportare le colture di copertura, di seminare il mais come coltura principale per due anni consecutivi.

Devono essere rispettate anche ulteriori norme che, oltre a quelle già definite per l'Azione 1, prevedono il rispetto dello Standard 2.1 attinente alla gestione delle stoppie e la conoscenza dei

Requisiti Minimi relativi all'uso di fertilizzanti e prodotti fitosanitari, di cui all'art. 13 del D.M. 22/12/2009 n° 30125.

L'importanza della necessaria adozione di pratiche colturali che permettono di produrre quantità abbondanti di prodotti agricoli rispettando il pianeta, riducendo le emissioni di gas serra, limitando il rilascio di sostanze inquinanti negli ecosistemi e garantendo numerosi vantaggi economici, ambientali, sociali, deve essere riconosciuta da tutti gli agricoltori, dalla popolazione mondiale e, soprattutto, dai gruppi politici. Questi ultimi, infatti, hanno il compito di governare i paesi assicurando delle buone condizioni di vita ai propri cittadini e garantendo modesti compensi finanziari ai coltivatori che decidono di intraprendere la conversione a un'agricoltura conservativa caratterizzata da un'elevata multifunzionalità ed eco-sostenibilità utile per il proseguimento della vita di molte specie animali e vegetali sulla Terra, uomo compreso.

1.4 La topografia ad alta risoluzione

Il continuo aumento delle potenzialità relative al mondo tecnologico ha permesso di produrre computer in grado di elaborare elevate quantità di dati in sempre meno tempo.

Ciò ha consentito un utilizzo dei sistemi informatici per l'effettuazione di numerose analisi e il calcolo dei parametri corrispondenti.

In questo caso, l'evoluzione degli apparecchi tecnologici è di notevole importanza se si considera la loro utilità per lo studio geomorfometrico della superficie nei vari territori.

La geomorfometria è una disciplina scientifica emergente che ha l'obiettivo di fornire una descrizione qualitativa delle forme della superficie terrestre con un approccio quantitativo, il quale è reso possibile dall'analisi del paesaggio mediante tecniche che utilizzano GIS (Geographic Information System, in italiano Sistema Informativo Geografico).

Per questo motivo, la geomorfometria può essere definita come la scienza che si occupa dell'analisi quantitativa della superficie terrestre tramite uno studio multidisciplinare che, comprendendo anche la matematica e la statistica, permette di utilizzare le immagini digitali rappresentanti la topografia di un territorio per quantificare le forme della superficie a diverse scale spaziali.

I sistemi GIS sono strumenti computerizzati che consentono di raccogliere, memorizzare, analizzare, calcolare, estrapolare, posizionare, richiamare e trasformare dati ed eventi georeferenziati in diversi sistemi di coordinate. In questo modo, è possibile convertire una grande massa di elementi numerici in precise informazioni relative alla geomorfologia della superficie oggetto di analisi.

Bisogna ricordare che, comunque, il GIS non è un sistema finalizzato alla produzione di decisioni in maniera automatica, ma si tratta di uno strumento utile per analizzare, interrogare e visualizzare alcuni dati a supporto del processo decisionale svolto dall'operatore.

Negli ultimi anni, le tecnologie di telerilevamento, definite anche "remote-sensing technologies" in inglese, sono state sfruttate proprio per ottenere delle analisi che permettessero di ricostruire la morfologia superficiale del terreno con lo scopo di poter ricavarne quantitativamente e qualitativamente i vari parametri morfometrici di particolare interesse.

Le tecnologie di telerilevamento o remote-sensing consentono la realizzazione delle operazioni di registrazione, osservazione e percezione di alcuni oggetti posti a una certa distanza dal sensore utilizzato per rilevare e classificare l'area di studio, attraverso l'emissione di segnali elettromagnetici che vengono propagati sulla superficie da analizzare.

I sensori di telerilevamento sono suddivisi in sensori attivi, i quali emettono la radiazione elettromagnetica direttamente sulle superfici da analizzare captando successivamente la

radiazione di ritorno, e sensori passivi, che invece misurano la radiazione riflessa delle sorgenti elettromagnetiche naturali o artificiali esterne, come ad esempio il Sole.

La tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) utilizza i sensori di remote-sensing attivi e permette di operare in qualsiasi condizione di luminosità anche in superfici affette da un'elevata presenza di zone ombreggiate. L'effettuazione dei rilievi geomorfologici per questo tipo di tecnologia prevede l'emanazione di un raggio laser sull'area da rilevare al fine di ottenere informazioni relative alle features (gli oggetti più o meno grandi presenti sul terreno e utili per la ricostruzione dei modelli digitali) e alle caratteristiche superficiali del terreno, senza alcun disturbo da parte della vegetazione, visto che questo raggio laser può filtrare automaticamente la parte epigea delle piante e altri oggetti considerati "di disturbo" e presenti sul terreno (Tarolli, 2014).

L'utilizzo del raggio laser (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation) permette di determinare, sulla base del tempo impiegato dall'impulso per essere riflesso dalla superficie colpita e ritornare al sensore, la corretta posizione dei punti presenti sulla superficie rilevata. Questo processo è chiamato "backscattering" e utilizza una radiazione elettromagnetica emessa tramite un fascio luminoso molto concentrato con una lunghezza d'onda compresa nell'infrarosso vicino (0.8-1.6 μm), con alcune eccezioni nella luce visibile (0.52 μm) (Gomasasca, 2004; Lo Brutto, 2005).

L'impronta a terra del raggio laser è definita "footprint" e possiede una dimensione compresa in un diametro che può andare dai 20 cm fino ad alcuni metri. I sensori si possono perciò distinguere in "small footprint", con una proiezione a terra di diametro che va dai 20 cm ai 2 m, oppure "large footprint", con una proiezione a terra che ha un diametro superiore ai 2 m. La velocità di scansione del laser utilizzato nelle tecniche LiDAR varia tra i 50 e i 100 impulsi al secondo (Gelmini, 2014).

Secondo quanto affermato da Tarolli et al. (2009), il sistema LiDAR consente di ottenere una nuvola di punti georeferenziata lungo gli assi x, y e z, dalla quale è possibile ottenere un modello digitale del terreno (DTM) oppure un modello digitale di superficie (DSM) su grandi aree e con una risoluzione sub-metrica in formato "raster", cioè composto da una serie di griglie regolari a maglia quadrata, oppure in formato "TIN" (Triangular Irregular Networks), cioè composto da reti di triangoli irregolari i cui vertici ricadono in corrispondenza dei punti di rilievo.

Il DTM consente il calcolo di una serie di parametri morfometrici come la pendenza, la mappa delle ombre, la curvatura e altri indici topografici. Il DTM, inoltre, si differenzia dal DSM poiché il primo rappresenta solo le superfici filtrando automaticamente gli elementi vegetativi e infrastrutturali, mentre il secondo rappresenta anche la vegetazione e le infrastrutture presenti sul terreno (Figura 1.3).

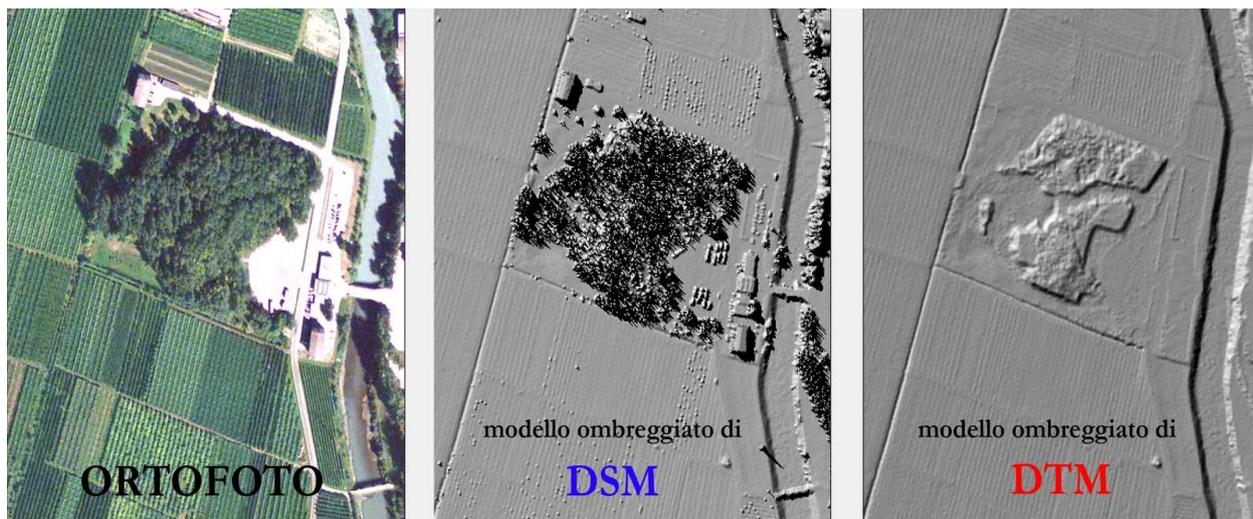


Figura 1.3 La differenza tra il DTM e il DSM (CHARTAGENA, 2011)

L'acquisizione dei DTMs attraverso LiDAR fornisce molteplici opportunità per lo studio approfondito dei cambiamenti della superficie associati ai processi geomorfologici che si alternano nel tempo (Chan et al., 2007), come per esempio nelle pianure alluvionali (Sofia et al., 2014), permettendo di fare una stima dell'evoluzione del paesaggio in quel preciso territorio (Roering et al., 2013).

In base allo scopo della ricerca e al tipo di rilievo che si deve eseguire, è opportuno utilizzare i sensori di telerilevamento montati su apparecchi che vengono utilizzati a terra (TLS, Terrestrial Laser Scanning) oppure in volo (ALS, Airborne Laser Scanning) grazie all'utilizzo dei mezzi volanti come aerei, elicotteri, satelliti e aeromobili a pilotaggio remoto chiamati anche UAV (Unmanned Aerial Vehicle).

I sistemi ALS rimangono in continuo movimento per poter coprire l'intera area di studio in poco tempo, infatti si muovono "a strisce" (Figura 1.4) e necessitano di un telemetro associato a un sistema GPS che ha la funzione di assegnare le corrette coordinate geografiche alle rispettive immagini del terreno per un allineamento ottimale al fine di ottenere un buon modello digitale del terreno; tuttavia possono fornire risultati non corretti nel caso in cui ci siano nubi o aerosol posizionati tra il sensore e l'oggetto da analizzare (Gomasca, 2004).

Per le loro caratteristiche, le tecnologie ALS vengono utilizzate su larga scala per studiare la modellazione dei territori, caratterizzare la morfologia degli eventi franosi, individuare le possibili zone a rischio idrogeologico, calcolare l'impatto delle infrastrutture sulla stabilità dei pendii, analizzare la struttura vegetazionale e altro ancora.

Nelle situazioni in cui, invece, si voglia eseguire un rilievo a scala ridotta, è possibile utilizzare i sistemi TLS che permettono un'analisi accurata delle varie zone, non particolarmente difficili da

raggiungere, e consentono di studiare le dinamiche multitemporali riguardanti i fenomeni naturali, come frane, colate detritiche e scioglimento dei ghiacciai (Carturan et al., 2013).

A livello agrario, i TLS sono stati utilizzati per valutare le caratteristiche geometriche della vegetazione (Moorthy et al., 2011), per determinare la quantità di vegetazione che potrebbe ostruire il normale flusso dell'acqua nelle scoline (Jalonen et al., 2015), per studiare le risposte delle piante allo stress e alla loro interazione con l'ambiente circostante (Omasa et al., 2007).

Il prerequisito principale per l'applicazione della tecnologia LiDAR è un elevato grado di competenza ed esperienza da parte dell'operatore con l'obiettivo di ricavare dati topografici superficiali non privi di significato, bensì di buona qualità per una caratterizzazione morfologica di elevato spessore (Tonkin et al., 2014).

Negli ultimi dieci anni, ulteriori tecniche innovative di telerilevamento hanno portato a un notevole aumento dei dati e delle informazioni a disposizione per la caratterizzazione morfologica della superficie terrestre e di altri oggetti (Tarolli, 2014).

In particolare, è stata sviluppata una nuova tecnica fotogrammetrica chiamata SfM (Structure from Motion), utilizzata per la ricostruzione tridimensionale, veloce, poco costosa e a elevata risoluzione di modelli digitali in vari contesti come: l'ingegneria civile (Park et al., 2007), l'architettura (Roncella et al., 2015), l'archeologia (Green et al., 2014), l'ecofisiologia (Omasa et al., 2007), la ricostruzione dei crateri vulcanici (James e Robson, 2012) e la rappresentazione 3D di edifici di notevole importanza storico-archeologica (Green et al., 2014). Questa tecnica è stata inizialmente sviluppata per piccoli edifici, poi ha conosciuto un periodo di rapida crescita e larghissima diffusione in diversi ambiti.

La tecnica di fotogrammetria SfM, al contrario di quanto avviene per LiDAR, si presenta come una tecnica facile da usare e a basso costo, ideale quindi per progetti di ricerca che dispongono di un piccolo budget, ma che necessitano comunque di ottenere dati topografici con un'elevata risoluzione dell'ordine del millimetro, sia su larga scala sia su scala ridotta (Westoby et al., 2012; Koutsoudis et al., 2014; Prosdocimi et al., 2015).

Nella Figura 1.4 sono mostrati i diversi modi per effettuare i rilievi con sistemi ALS, TLS e SfM.

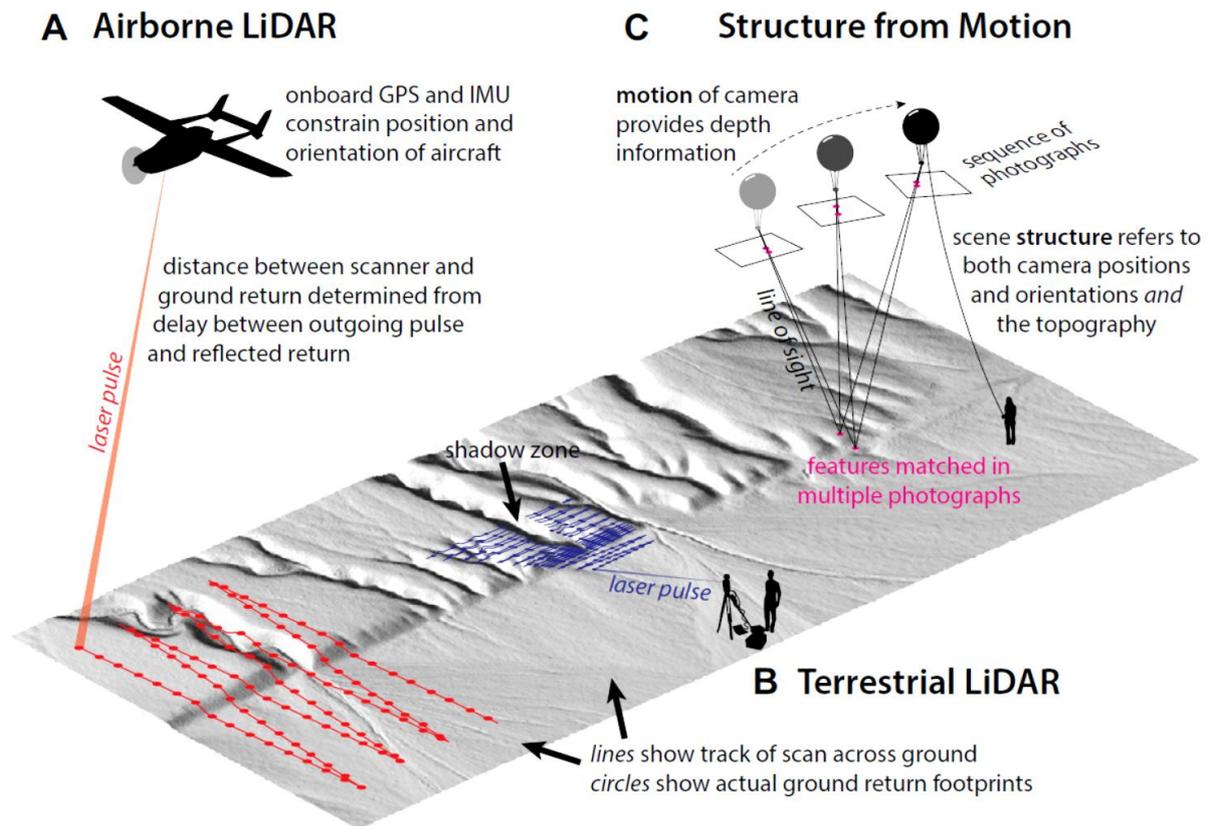


Figura 1.4 Rappresentazione dei metodi ALS LiDAR, TLS LiDAR e SfM (Johnson et al., 2012)

La tecnica SfM è un metodo che permette di ricostruire la geomorfologia della superficie terrestre tramite la costruzione di una nuvola di punti tridimensionale ricavata dall'acquisizione e dall'allineamento automatizzato di un'elevata quantità di immagini relative allo stesso oggetto di studio (Fonstad et al., 2013).

Inoltre, con questa tecnica, non è necessario conoscere preventivamente le precise coordinate geografiche della posizione da cui viene effettuato lo scatto fotografico poiché, attraverso l'utilizzo di targets posti in prossimità dell'area di studio e per i quali sono stati calcolati i valori della latitudine, della longitudine e dell'altimetria con l'uso di un GPS, è possibile georeferenziare l'intera nuvola di punti in un secondo momento.

Pertanto, per effettuare la ricostruzione delle aree di studio attraverso i rilievi fotogrammetrici non è obbligatorio dotarsi di apparecchiature molto costose e che richiedono una preparazione specifica per il loro utilizzo. Infatti, i software da scaricare sono gratuiti o comunque a basso costo, serve solo un computer che abbia delle buone capacità hardware in quanto la quantità di punti da rappresentare è molto alta, basta utilizzare una camera digitale o la fotocamera di uno smartphone di ultima generazione, non è necessario ma è consigliato possedere una piattaforma aerea oppure un drone per l'effettuazione delle foto dall'alto e un GPS per la rilevazione delle relative coordinate geografiche dei targets.

Le discipline agrarie che utilizzano questa tecnica fotogrammetrica sono in continuo aumento e molti autori sembrerebbero confermare l'ottima predisposizione della tecnica SfM anche in ambito agricolo. Per esempio sono già stati effettuati numerosi studi utilizzando i modelli digitali del terreno ricavati dalle elaborazioni delle nuvole di punti ottenuti con la tecnica fotogrammetrica SfM e che riguardano il monitoraggio dell'erosione nelle reti di drenaggio dei campi agrari (Prodocimi et al., 2015), la quantificazione dei tassi di erosione nelle coste (James e Robson, 2012), la modellazione dei corsi d'acqua a canali intrecciati (Javernich et al., 2014), lo studio delle modificazioni multitemporali nella morfologia del paesaggio tramite l'uso di foto aeree storiche (Gomez et al., 2015), la produzione di DTMs degli spartiacque nei terreni agricoli (Ouèdraogo et al., 2014).

Per quanto riguarda il calcolo delle caratteristiche della vegetazione presente sul terreno analizzato, come la densità di vegetazione e l'indice di area fogliare (in inglese Leaf Area Index, da cui l'acronimo LAI), è stato dimostrato da Straatsma et al. (2008) e Bollettin (2016) che i dati migliori e più realistici possono essere ricavati con sistemi di TLS e non con la tecnica SfM.

In generale, la tecnica SfM permette di ottenere rappresentazioni 3D della zona oggetto di studio in modo rapido ed efficace con l'utilizzo di hardware poco costosi e software open-source o comunque low-cost, senza rinunciare tuttavia a un'ottima qualità e accuratezza del risultato.

Purtroppo, la tecnica fotogrammetrica SfM presenta alcuni svantaggi quali: la necessità di avere molte immagini per una buona ricostruzione dell'oggetto di studio, le numerose ore di lavoro indispensabili per l'allineamento ottimale delle fotografie e la mancanza di filtrazione automatica della vegetazione che richiede una successiva eliminazione manuale delle piante di disturbo (Shervais, 2016). La tecnica SfM, infatti, utilizza gli algoritmi SIFT o, più recentemente, SURF, i quali richiedono lunghi tempi per l'elaborazione dei dati; la proiezione ottica si basa su semplici fotografie digitali perciò non si riesce a filtrare oltre la prima proiezione dell'immagine e non si ottiene una rappresentazione grafica del terreno "nudo" privo di vegetazione; ad oggi non è ancora stato definito un numero minimo di foto necessarie alla ricostruzione tridimensionale dell'oggetto da analizzare pertanto è consigliabile eseguire il maggior numero di rilievi fotogrammetrici possibile.

1.5 Obiettivo della tesi

Le potenzialità che caratterizzano l'agricoltura conservativa sono numerose e, come affermato in precedenza, permettono uno sviluppo eco-sostenibile in grado di sfruttare efficacemente le risorse naturali per far fronte alla continua richiesta di cibo da parte della popolazione umana in continuo aumento.

Da una prima analisi della letteratura, sembrerebbe che, nei campi agrari interessati da agricoltura conservativa, nello specifico no-tillage, la topografia superficiale presenta numerose differenze rispetto ai campi interessati da lavorazioni convenzionali dopo parecchi anni dalla conversione.

La fattibilità e l'efficacia della tecnica di telerilevamento SfM, dimostrate in numerosi ambiti di studio, potrebbero essere utilizzate anche per rivelare le modificazioni della geomorfologia superficiale dei terreni in cui sono state adottate le tecniche agricole di tipo conservativo, permettendo il calcolo di alcuni indici morfometrici di particolare interesse.

Tramite l'utilizzo di questa innovativa tecnica di telerilevamento, in questa tesi è stata effettuata una caratterizzazione della morfologia superficiale di tre aree di studio posizionate all'interno di un appezzamento agricolo in cui viene effettuata semina su sodo e di altre tre aree posizionate all'interno di un terreno lavorato con tecniche tradizionali per dimostrare che, a meno di due anni dalla conversione, il campo agrario interessato dalle tecniche conservative presenta già una morfologia superficiale differente, tale per cui, l'erosione del suolo e gli effetti negativi ad essa collegati, dovrebbero presumibilmente essere mitigati.

I rilievi fotogrammetrici eseguiti per queste analisi sono stati elaborati con vari software per ottenere i modelli digitali del terreno (DTMs) di ognuna delle sei aree di studio, i quali sono stati successivamente utilizzati per il calcolo degli indici morfometrici di particolare interesse come: la pendenza, la mappa delle ombre, le curvature, la scabrezza superficiale, la connettività, le direzioni del flusso e l'area drenata.

Una volta calcolati i diversi parametri morfometrici, è stata eseguita un'analisi dei valori di media, minimo, massimo, mediana, indice di asimmetria e deviazione standard degli indici di curvatura media, scabrezza superficiale e connettività, la quale ha permesso di identificare quali fossero le differenze principali tra le morfologie superficiali delle aree di studio.

In questo modo, oltre ad arricchire la banca dati inerente alle sperimentazioni effettuate per determinare la presenza di modifiche superficiali e i possibili benefici ottenuti dall'adozione dell'agricoltura di tipo conservativo, è stata dimostrata l'importanza dell'efficacia e dell'applicabilità della nuova tecnologia di telerilevamento SfM, veloce e a basso costo, per lo

studio delle caratteristiche delle superfici legate al mondo agricolo e interessate da differenti tecniche di coltivazione.

2. Area di studio

2.1 L'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo"

Il luogo in cui sono collocate le aree di studio analizzate in questa tesi è l'Azienda Agraria Sperimentale "Lucio Toniolo" situata in Viale dell'Università n°4 a Legnaro (45°20'52"N, 11°57'12"E), in provincia di Padova, nei pressi del Campus di Agripolis dell'Università degli Studi di Padova (Figura 2.1). Il 17 Aprile 2013, con l'emanazione del Decreto del Magnifico Rettore n°1100, quest'organismo si è dotato di un proprio statuto riuscendo a raggiungere una particolare autonomia gestionale sotto la direzione del Prof. Giuseppe Zanin. L'azienda ospita numerose esercitazioni promosse e realizzate per la didattica dei diversi corsi previsti dalla Scuola di Agraria e di Medicina Veterinaria dell'Università. La superficie totale che viene attualmente occupata dall'ente nel territorio legnarese è di 76,24 ha (Zanin, 2016).

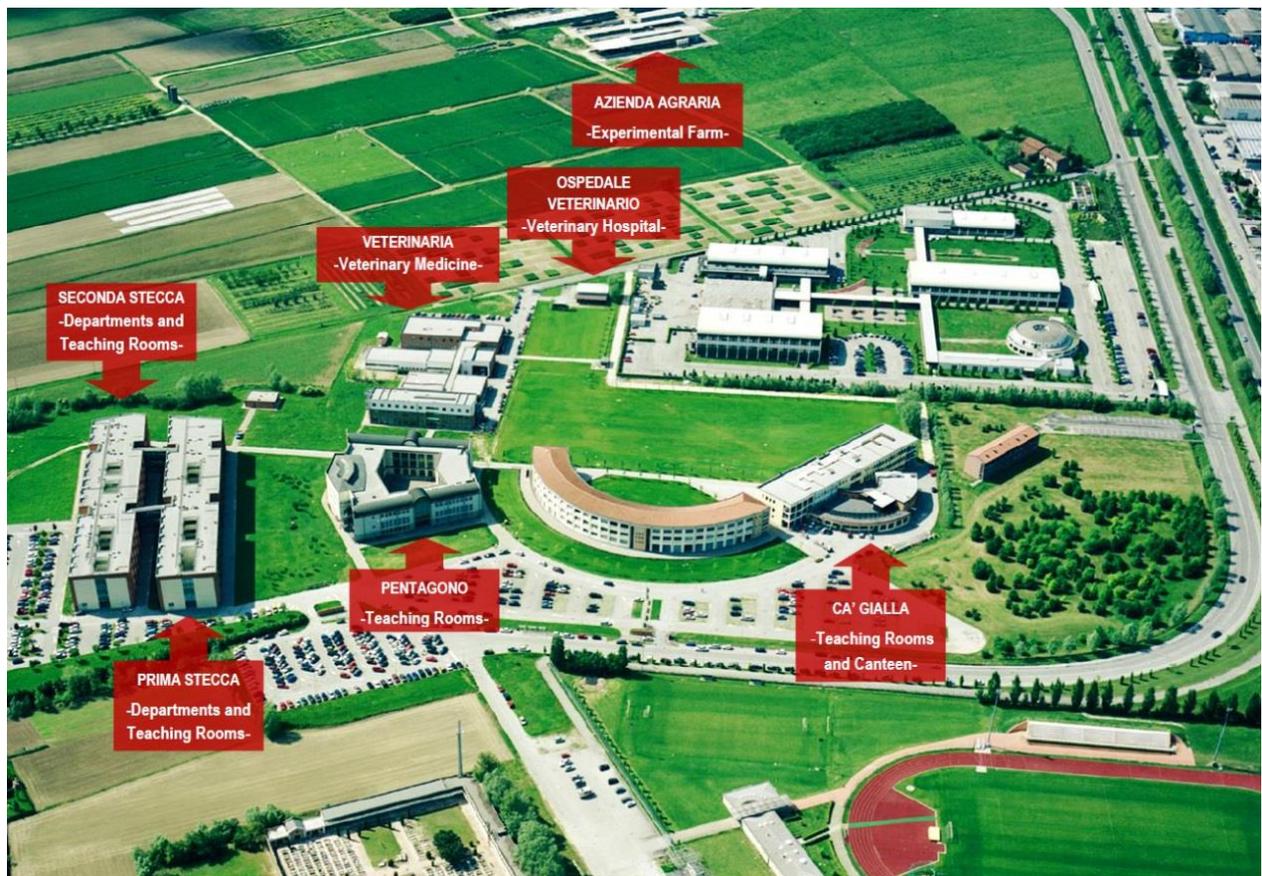


Figura 2.1 Posizione dell'Azienda Agraria Sperimentale "L. Toniolo" nei pressi del Campus di Agripolis (Università degli Studi di Padova, 2016)

In generale, la situazione climatica di quest'area rientra nella tipologia mediterranea, tuttavia sono presenti alcune caratteristiche che la rendono unica poiché si trova in una zona di transizione tra l'ambiente alpino e quello litorale del Mar Adriatico. In quest'area perciò sono

singolari le estati siccitose e gli inverni miti tipici del clima mediterraneo, bensì si possono avvertire estati calde e inverni freddi.

In estate, la zona si trova sotto l'influenza dell'anticiclone delle Azzorre caratterizzato da lunghi periodi di alta pressione. Nel periodo estivo, infatti, le temperature massime si aggirano intorno a un valore medio di 29°C. In tale stagione le precipitazioni sono perlopiù a carattere temporalesco e originate da movimenti termoconvettivi che si verificano nelle ore centrali della giornata quando, in questo territorio ricco di vegetazione e acque superficiali, le masse d'aria vengono sufficientemente umidificate e riscaldate dal suolo. Questo fenomeno provoca numerosi eventi temporaleschi, spesso di breve durata e di elevata intensità, che impediscono lo sviluppo di condizioni di siccità. Durante l'inverno le temperature diminuiscono bruscamente a causa dei venti settentrionali con masse d'aria artica e dei venti occidentali che spingono le masse d'aria polare dall'Oceano Atlantico. In questo periodo la temperatura minima media è di -1°C. Talvolta, l'incontro dell'anticiclone Russo-Siberiano con quello delle Azzorre costituisce un blocco alle perturbazioni provenienti da Nord, creando così una scarsità di precipitazioni durante il periodo invernale. In autunno e in primavera, le perturbazioni provenienti dall'Atlantico non trovano alcun anticiclone che impedisca loro di arrivare sul territorio del Veneto, perciò la regione è colpita da forti e abbondanti piogge. Per quanto riguarda le temperature medie annuali si registrano valori minimi intorno ai 7-10°C, mentre le massime sono comprese tra i 18 e i 20°C (Monai et al., 2003).

Nel Comune di Legnaro, il regime pluviometrico annuo presenta i massimi valori nella stagione autunnale e in quella primaverile, invece i valori minimi vengono riscontrati durante l'inverno. I giorni piovosi, ossia quelli caratterizzati da un valore di pioggia giornaliero superiore a 1 mm, sono 81 nel corso dell'anno e la quantità media di precipitazioni atmosferiche annue è di 848 mm (ARPAV, 2016a). La velocità del vento a 10 m dal suolo, misurata dal 2010 a oggi dalla stazione meteorologica di riferimento situata nel Comune di Legnaro e localizzata in corrispondenza della "X" rossa nella Figura 2.2, è mediamente di 1,9 m/s in un anno ed è orientata principalmente nella direzione Nord-NordEst. L'umidità relativa a 2 m dal suolo calcolata negli ultimi sei anni ha un valore minimo medio compreso tra il 49% e il 57%, invece quello massimo si trova tra il 93% e il 98% (ARPAV, 2016b).



Figura 2.2 L'ubicazione della stazione meteorologica ("X" rossa) del Comune di Legnaro all'interno dell'Azienda Agraria Sperimentale "L. Toniolo" (Google Earth, 2016)

L'azienda agraria "L. Toniolo" si trova a un'altitudine di 8 m s.l.m. ed è posizionata su una superficie pianeggiante facente parte della Pianura Padana nel Nord-Est dell'Italia. La sistemazione idraulico-agraria aziendale è quella tipica dei terreni di medio impasto presenti in questa zona, infatti, è realizzata con affossature di tipo "larga ferrarese". Questa sistemazione è costituita da ampi appezzamenti di forma rettangolare con una larghezza di circa 30-50 m e una lunghezza che può superare i 200 m, così da migliorare le condizioni utili alla meccanizzazione dei campi con colture di tipo seminativo. La baulatura longitudinale è resa possibile grazie a linee di pendenza orientate in maniera simmetrica verso i lati più lunghi del rettangolo e con la linea di colmo disposta lungo la mezzeria dell'appezzamento stesso. In questo modo l'acqua in

eccesso viene indirizzata verso le scoline poste a ridosso dei lati maggiori della porzione di terreno agrario per poi confluire nei capofossi posti lungo le testate dei campi e affiancati dalle capezzagne che permettono il transito delle macchine agricole (Giardini, 1986).

Le colture più utilizzate sono mais, frumento e soia, seguite dalla barbabietola da zucchero, dalla colza, dal vigneto e da altre specie utili alla didattica. Le rese medie sono: 10 t/ha di granella secca di mais; 6,5 t/ha di frumento; 4 t/ha di soia; 12 t/ha di saccarosio grezzo nella barbabietola da zucchero (Zanin, 2016). Le zone libere da queste colture principali sono destinate al prato, al pascolo e alla selvicoltura di pioppeti.

Secondo le analisi effettuate da Marinello et al. (2015), in base alle percentuali rilevate nel terreno dell'azienda con argilla al 13%, limo al 40% e sabbia al 47%, il suolo dell'azienda è classificato di tipo "franco" o "loam", in accordo con quanto previsto dal "triangolo delle tessiture" (FAO, 2006). Il contenuto di sostanza organica è dell'1%; il pH ha valore medio 8; l'umidità presente nel suolo è del 16%; i nitrati hanno una percentuale totale dello 0,1%; il carbonato di calcio è presente al 24% e la C/N ratio è di 7,5 (Marinello et al., 2015).

2.2 Disegno sperimentale

I due campi agrari scelti per l'effettuazione delle analisi geomorfologiche previste da questa tesi sono situati all'interno della superficie dell'Azienda Agraria Sperimentale "L. Toniolo". Gli stessi sono stati entrambi interessati dalla crescita delle piante di soia dall'inizio del mese di Giugno fino alla fine di Ottobre, per poi ospitare la coltivazione di frumento nel periodo autunno-vernino. La soia, infatti, è una tipica pianta da rinnovo a ciclo primaverile-estivo utilizzata come coltura intercalare tra coltivazioni successive di grano oppure di mais.

Su questi due appezzamenti di terreno sono state effettuate ulteriori e specifiche analisi tessiturali del suolo da parte del Laboratorio DAFNAE dell'Università di Padova, il quale ha fornito i valori riportati in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 I valori delle analisi del suolo eseguite dal Laboratorio DAFNAE

SUOLO	pH	Argilla (%)	Limo (%)	Sabbia (%)	Tessitura
Suolo del campo coltivato in modo convenzionale	7,83	28	28	44	clay loam franco argilloso
Suolo del campo coltivato in modo conservativo	7,85	30	28	42	clay loam franco argilloso

Come si nota, i pH e i valori percentuali delle singole componenti del suolo non discostano molto tra loro; ciò è dovuto al fatto che le tre aree prese come riferimento per le tecniche di agricoltura conservativa si trovano in una zona che è interessata dalle lavorazioni di no-tillage solamente da circa un anno e mezzo. L'ultima lavorazione del terreno con tecniche convenzionali risale, infatti, al mese di Ottobre dell'anno 2014, quando è stato coltivato frumento e successivamente è stata eseguita la semina su sodo del mais. Per questo motivo, le caratteristiche tessiturali del suolo presente in questa parte dell'azienda agraria non differiscono molto da quelle che si trovano nel campo coltivato con tecniche convenzionali.

Nel prosieguo degli anni, tuttavia, ci si aspetta una progressiva variazione dei valori analizzati con un conseguente aumento delle differenze tra le zone lavorate con tecniche di agricoltura conservativa rispetto a quelle coltivate con metodi convenzionali.

Nella Figura 2.3 sono indicate le esatte posizioni delle sei aree che sono state scelte per analizzarne l'aspetto geomorfologico con una caratterizzazione della loro morfologia superficiale. Le sei aree sono state suddivise in due gruppi da tre aree ciascuno per permettere

l'effettuazione di un'analisi statistica che evitasse l'insorgere di errori collegati alle preferenze dell'operatore durante la scelta dell'area di riferimento.

I due gruppi sono composti rispettivamente da tre aree localizzate nel campo interessato da agricoltura di tipo conservativo e da tre aree che si trovano, invece, nella superficie agricola lavorata con tecniche convenzionali. In questo modo, è possibile identificare le tre aree di ogni gruppo attraverso un nome composto dal numero identificativo di ogni zona (1, 2 e 3) e una o due lettere che indicano la tipologia di lavorazione utilizzata: le aree con la lettera "C" corrispondono a terreni interessati da agricoltura conservativa, le aree contraddistinte da "NC" corrispondono a terreni interessati da agricoltura non conservativa perciò convenzionale.



Figura 2.3 Posizione delle tre aree nel campo coltivato con tecniche conservative (C = Conservativo) e delle altre tre aree nel campo lavorato con metodi convenzionali (NC = Non Conservativo)

La scelta delle sei aree di studio è avvenuta in maniera casuale all'interno dei due campi agrari, facendo comunque attenzione al fatto che le aree stesse risultassero essere il più rappresentative possibile della tecnica di lavorazione utilizzata in quello specifico appezzamento di terreno. Inoltre, le zone interessate non possedevano molta vegetazione perciò questo ha permesso di limitare i problemi nella fase di calcolo dei parametri morfometrici causati dal disturbo della coltura e della flora infestante.

Nella Figura 2.4 sono riportate le foto effettuate alle sei aree oggetto di analisi. Come si può notare, le zone fotografate presentano numerose file di piantine di soia e qualche infestante erbacea, tuttavia la loro taglia non influenza drasticamente la possibilità di ottenere una rappresentazione tridimensionale della singola area di studio.

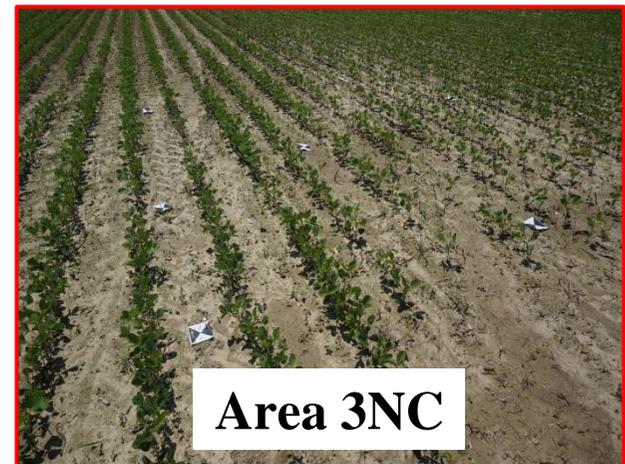


Figura 2.4 Le foto di ognuna delle sei aree analizzate

In generale, le aree che si trovano all'interno dei confini del campo interessato da agricoltura conservativa presentano numerosi residui colturali provenienti dalle precedenti coltivazioni e lasciati sul terreno come previsto dalla definizione dell'agricoltura conservativa. Nello specifico, nell'Area 3C sono ben visibili le file coperte completamente dal materiale di pacciamatura.

Le aree lavorate con tecniche convenzionali mostrano i segni lasciati sulla superficie dalle ruote del trattore utilizzato per le operazioni di semina, ad esempio nella parte sinistra della foto dell'Area 1NC. Inoltre, le rappresentazioni delle aree non conservative rivelano numerosi depositi di sedimenti causati da fenomeni di ruscellamento superficiale che hanno creato alcuni fossetti nel terreno, come si nota nell'Area 3NC.

3. Materiali e metodi

La prima parte di analisi che è stata eseguita sui due terreni coltivati nell'azienda agraria sperimentale "L. Toniolo" ha visto l'effettuazione di rilievi fotogrammetrici con la tecnica "Structure from Motion" (SfM) di tre aree scelte sul campo coltivato con metodi di lavorazione convenzionali e altre tre su quello in cui sono state adottate tecniche di tipo conservativo.

3.1 La tecnica fotogrammetrica "Structure from Motion"

La tecnica fotogrammetrica SfM è una tipologia di remote-sensing poco costosa e non invasiva che permette all'operatore di ottenere una ricostruzione tridimensionale e realistica ad alta risoluzione della zona oggetto di studio, attraverso l'effettuazione di fotografie scattate da differenti prospettive per poterne poi ricavare i dati di particolare interesse utilizzando ulteriori software open source o a pagamento. Si differenzia dalle tecniche di fotogrammetria convenzionale poiché non richiede l'analisi a priori della geometria della scena con le relative posizioni e angolazioni della fotocamera, ma esegue questi calcoli in automatico grazie alla sovrapposizione parziale delle foto scattate e alla georeferenziazione di alcuni targets posti all'interno dell'area fotografata (Westoby et al., 2012). Inoltre, la tecnica fotogrammetrica SfM non richiede grandi investimenti di denaro finalizzati all'acquisto di apparecchiature sofisticate o alla manutenzione delle stesse poiché le uniche strumentazioni da utilizzare sono una macchina fotografica portatile e un computer, i quali sono semplici da usare e non richiedono alcun tipo di esperienza pregressa (Micheletti et al., 2015).

Si tratta di una tecnica che iniziò il suo sviluppo negli anni '90 con Spetsakis e Aloimonos (1991) che la proposero inizialmente alla comunità degli esperti sviluppatori di programmi per "computer vision"; si tratta di un insieme di processi finalizzati alla ricostruzione di un modello reale tridimensionale partendo da rappresentazioni di tipo bidimensionale. Snavely et al. (2008), la usarono negli anni 2000 per produrre un'immagine 3D della superficie dell'intero pianeta Terra attraverso l'utilizzo dell'enorme patrimonio fotografico che si poteva trovare nel web.

Nel complesso, le zone interessate dalle analisi fotogrammetriche SfM sono state sei e tutte scelte in maniera casuale, comunque facendo attenzione al fatto che queste potessero rappresentare al meglio le caratteristiche presenti nel campo agrario dove sono collocate, così da poter ottenere dei risultati veritieri che tengono conto delle condizioni medie presenti nel terreno e non delle preferenze dell'operatore. Le foto delle sei aree sono state eseguite in data 7 Giugno 2016. In questa giornata, le condizioni meteorologiche di alta pressione, che già da tempo interessavano la zona, hanno impedito l'alterazione sostanziale della morfologia superficiale del suolo provocata solitamente dalle abbondanti precipitazioni atmosferiche, permettendo così il

passaggio tra le file di semina senza arrecare gravi danni alla coltura e rendendo i rilievi fotogrammetrici molto attendibili e poco influenzati dalle condizioni che si sarebbero potute ottenere dopo un evento piovoso di forte intensità. Inoltre, la luce solare che ha interessato la zona durante lo svolgimento dei rilievi, ha permesso l'ottenimento di fotografie di ottima qualità, anche se erano presenti delle ombre in prossimità delle plantule di soia o delle piante infestanti, che però non hanno creato problemi alla costruzione della rappresentazione tridimensionale.

Per ogni area sono stati infissi nel terreno, usando dei chiodi, 10 targets costruiti semplicemente stampando due triangoli isosceli neri posizionati con il vertice coincidente in maniera simmetrica rispetto al punto centrale di un foglio di carta quadrato di colore bianco come si può osservare nella Figura 3.1. La dimensione dei targets è di circa 15×15 cm, ciò permette di non coprire parti dell'area che potrebbero essere di particolare interesse e consente di effettuare un'accurata georeferenziazione dell'area, anche se i targets stessi non risultano essere perfettamente perpendicolari all'obiettivo della fotocamera al momento del rilievo fotogrammetrico.



Figura 3.1 Uno dei targets infissi al suolo con l'uso di chiodi

I 10 targets sono stati posizionati sul terreno in modo tale da formare un'area pressoché quadrata di 9 m², nella quale otto targets si trovano sui quattro lati perimetrali e sui quattro vertici dell'area stessa, mentre nella parte centrale del quadrato creato si trovano gli altri due targets rimasti. Durante questa fase si è evitato di calpestare la parte di terreno compresa nell'area delimitata dagli 8 targets perimetrali, così da non danneggiare lo strato superficiale del suolo ed evitare la creazione di alcune depressioni, le quali potrebbero arrecare numerose problematiche nelle fasi di produzione delle ricostruzioni grafiche e provocare degli errori rilevanti nel calcolo degli indici morfometrici.

Agisoft PhotoScan è un software a pagamento che permette l'orientamento automatico di grandi quantità d'immagini, facendo risparmiare all'utente il lungo compito della sovrapposizione dei tie-points, ossia dei pixels di correlazione tra una foto e l'altra. Ciò è possibile grazie all'utilizzo di un algoritmo molto simile a quello denominato SIFT (Scale Invariant Feature Transform), pubblicato da David G. Lowe nel 1999 e brevettato negli USA presso la University of British Columbia (Lowe, 1999; Lowe, 2004).

Questo algoritmo è stato sorpassato recentemente da SURF (Speeded Up Robust Feature) che permette di avere una più veloce elaborazione dei dati e di ottenere migliori trasformazioni delle immagini.

La minima risoluzione che deve avere la fotocamera da utilizzare per l'effettuazione dei rilievi fotogrammetrici caricabili in PhotoScan è di 5 Megapixel, con una lunghezza focale 35 mm equivalente intorno ai 50 mm (Agisoft LLC, 2012). La macchina fotografica, usata per questa tesi, è stata la fotocamera digitale compatta Sony NEX-5, ottimale per eseguire tale operazione perché dotata di un obiettivo con 16 Megapixel di risoluzione, sensore Exmor APS HD CMOS e una lunghezza focale 35 mm equivalente variabile tra i 27 e 83 mm.

Il numero di fotografie effettuate per ogni area varia da un minimo di 77 a un massimo di 95, con una media che si aggira intorno alle 90 foto totali per ciascuna area, di cui ogni trentina è stata realizzata a tre differenti altezze e angolazioni rispetto al terreno. Come richiesto dalle linee guida del software PhotoScan (Agisoft Photoscan, 2016), le foto sono state eseguite compiendo tre giri completi intorno all'area di riferimento e facendo attenzione a rimanere sempre frontali al centro dell'area stessa, ruotandoci intorno, in modo tale da riuscire a includere la maggior parte dei targets posti sul terreno. Ogni foto è stata scattata facendo attenzione a ottenere una sovrapposizione dell'immagine con quella precedente di almeno il 60%, altrimenti il software avrebbe riscontrato alcuni seri problemi nella fase di allineamento delle fotografie eseguite, a causa degli errori sistematici nella ricostruzione (Westoby et al., 2015).

In generale, le prime 30 fotografie di ogni area analizzata sono state scattate a un'altezza di circa 1,50 m mantenendo la macchina fotografica inclinata leggermente verso il basso. I successivi 30 scatti sono stati eseguiti a un'altezza da terra di 1,80 m aumentando l'inclinazione dell'obiettivo verso il basso. Infine, le ultime 30 immagini sono state catturate a un'altezza di circa 2 m orientando la fotocamera verso il basso e cercando di inquadrare il centro dell'area. Per ogni scatto è stata prestata molta attenzione al fatto che la foto fosse eseguita perfettamente "a fuoco", in modo tale che il software informatico Agisoft PhotoScan potesse riconoscere con facilità i targets utilizzati, al fine di ottenere un corretto allineamento delle fotografie scattate a una lunghezza focale 35 mm equivalente di circa 50 mm. Nella Figura 3.2 è rappresentata

l'elaborazione ottenuta con Agisoft PhotoScan dopo l'allineamento delle 87 foto effettuate per l'Area 1C.

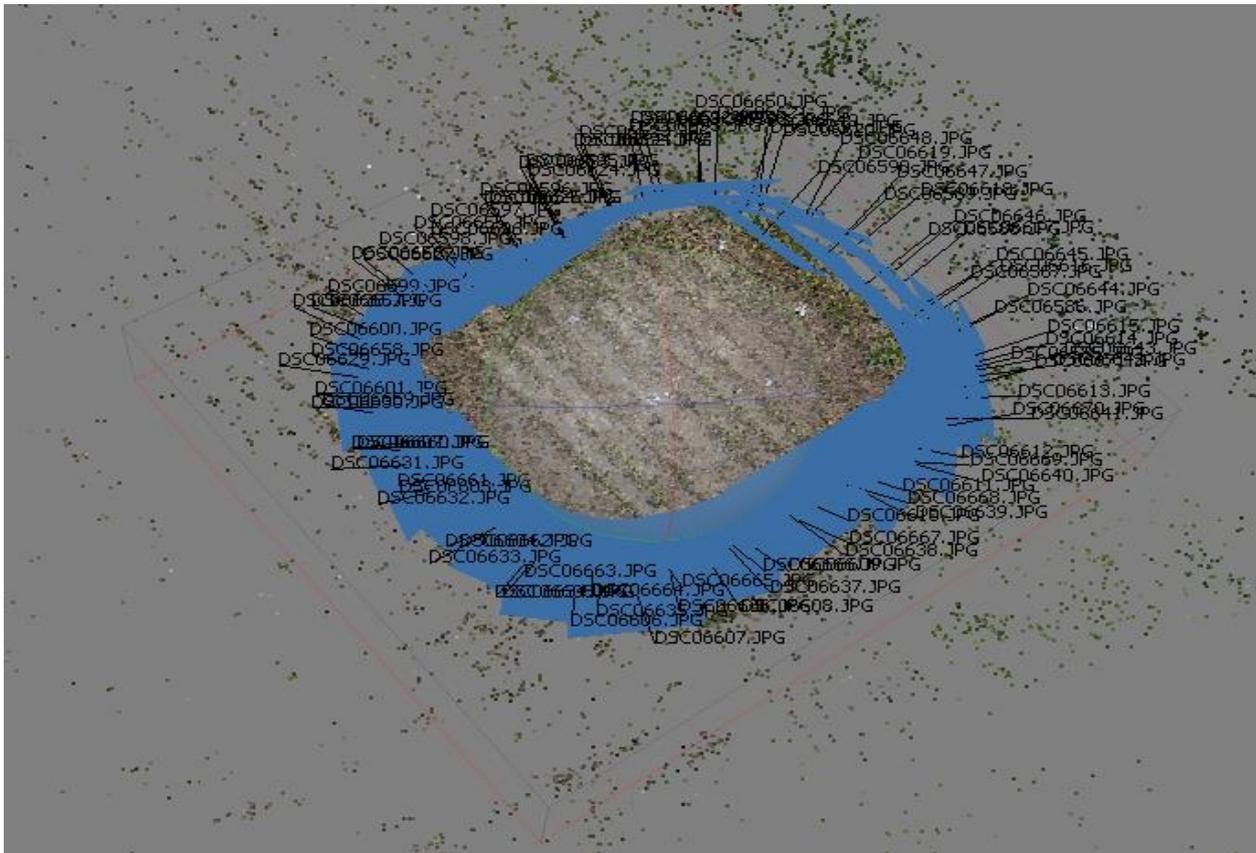


Figura 3.2 Fase di allineamento delle foto dell'Area 1C con Agisoft PhotoScan

Per ottenere una corretta geolocalizzazione degli scatti eseguiti, si è reso necessario l'utilizzo di una strumentazione GPS molto precisa e affidabile, il ricevitore GNSS (Global Navigation Satellite System) Topcon HiPer V, che ha permesso di rilevare l'esatta posizione geografica e l'altimetria del centro di ogni singolo target. Per eseguire queste misurazioni, infatti, il GPS era provvisto di un controller da campo indurito con touch screen e un'asta graduata telescopica, la cui punta è stata posizionata al centro dei 10 targets per la rilevazione delle precise coordinate geografiche di ognuno di essi (Figura 3.3).



Figura 3.3 Il ricevitore GNSS Topcon Hiper V utilizzato per la georeferenziazione dei targets

In questo modo, una volta che le foto sono state caricate e allineate in Agisoft PhotoScan, è stato possibile associare le corrette coordinate al centro di ogni singolo target. Con l'utilizzo delle funzioni di cui è provvisto questo software, i targets sono stati georeferenziati automaticamente secondo un sistema di coordinate virtuale, in modo tale da rendere possibile la creazione di una ricostruzione in 3D dell'intera area fotografata sottoforma di nuvola di punti (Figura 3.4).



Figura 3.4 La nuvola di punti con i 10 targets georeferenziati dell'Area 1C

Dopo aver georeferenziato tutti i 10 targets per ognuna delle sei aree di studio, è stato possibile calcolare i valori degli errori presenti negli assi x, y e z, causati dall'allineamento non sempre perfetto dei rilievi fotogrammetrici eseguiti in campo. Nella Tabella 3.1 è rappresentato il RMSE (Root Mean Square Error), cioè l'errore quadratico medio presente in ognuna delle sei aree di studio e dovuto agli errori di allineamento prodotti da PhotoScan.

Il calcolo del RMSE è indicato nella formula (3.1):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (3.1)$$

dove $X_{obs,i}$ corrisponde al valore previsto per il campione i -esimo e $X_{model,i}$ corrisponde al valore reale del modello ricostruito del campione i -esimo.

Tabella 3.1 RMSE calcolato da PhotoScan per le sei aree di studio

RMSE	Asse x [± m]	Asse y [± m]	Asse z [± m]
Area 1C	0,004	0,011	0,019
Area 1NC	0,027	0,014	0,019
Area 2C	0,129	0,113	0,042
Area 2NC	0,006	0,010	0,015
Area 3C	0,006	0,004	0,012
Area 3NC	0,005	0,012	0,015

Come si può notare, i valori dell'errore quadratico medio riportati in tabella sono molto piccoli e confermano la buona qualità dell'esecuzione delle fotografie effettuate in campo e successivamente utilizzate per la ricostruzione dei modelli tridimensionali delle aree di studio. Inoltre, bisogna anche considerare il fatto che, dopo aver effettuato l'allineamento delle fotografie e la georeferenziazione dei targets posti all'interno dell'area di studio, gli errori suddetti sono stati portati al minimo automaticamente grazie all'impiego di queste funzioni.

In generale, gli errori per ciascun asse sono inferiori o uguali a 1 cm, perciò questo ha permesso la costruzione dei modelli digitali del terreno con una risoluzione molto elevata corrispondente, appunto, a 1 cm.

Tutto il lavoro effettuato con Agisoft PhotoScan ha impiegato un periodo di tempo variabile dalle 8 alle 10 ore di lavoro, in quanto la nuvola di punti creata possiede parecchi milioni di punti e la qualità della rappresentazione è stata sempre impostata come “high”, cioè quella il più elevata possibile considerando le caratteristiche hardware dei computer utilizzati durante le fasi di elaborazione. Le nuvole di punti sono state salvate come file in formato ASCII e LAS per poter essere importate facilmente in altri programmi di analisi.

Nella ricostruzione tridimensionale delle sei aree erano presenti anche le piantule di soia e alcune infestanti in fase di crescita (Figura 3.5), perciò si è resa necessaria la pulizia molto accurata delle rappresentazioni 3D da queste ultime, poiché esse disturbavano eccessivamente il calcolo degli indici morfometrici. Per fare ciò, è stato utilizzato il programma informatico CloudCompare (CloudCompare, 2016) che ha permesso di eliminare le parti invasive sfruttando il comando “Segment” (Figura 3.6).



Figura 3.5 L'Area 1C con le piantine di soia e la vegetazione infestante

La rimozione manuale delle migliaia di punti che insieme ricostruivano la forma tridimensionale delle piantule è stata possibile poiché questi erano ben visibili e facili da identificare. In altri contesti, nei quali, per esempio, la risoluzione non fosse così elevata o la ricostruzione tridimensionale non producesse una buona figura rappresentativa dell'area analizzata, questa pulizia sarebbe risultata decisamente infattibile, creando numerose problematiche al momento del calcolo degli indici morfometrici. In questo caso, il tempo di lavoro si aggira intorno alle 2 ore, visto che bisogna prestare la massima attenzione nella pulizia delle piantule e dei punti

outlier che potrebbero creare degli errori, i cosiddetti “rumori”, durante la misurazione degli indici morfometrici d’interesse.

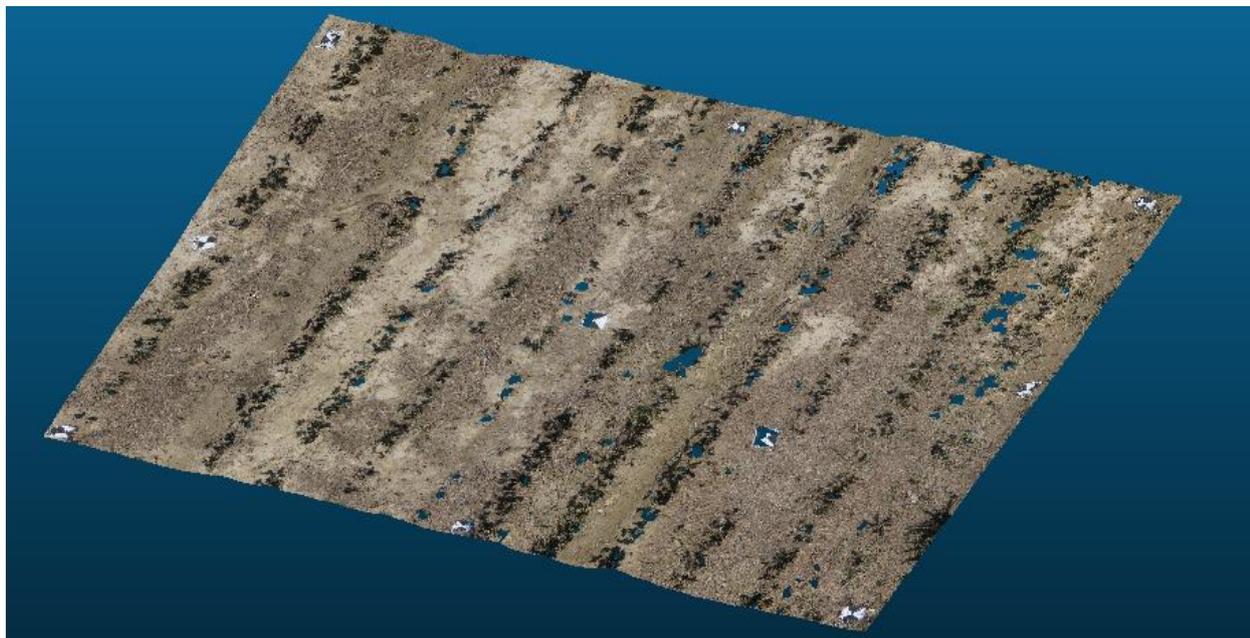


Figura 3.6 L’Area 1C pulita dalla vegetazione con CloudCompare

La nuvola di punti georeferenziata e pulita è stata poi importata nel software ArcMap (ArcMap, 2015) per la creazione dei DTMs (Digital Terrain Models) a varia risoluzione di cella. Il modello digitale del terreno consiste in una rappresentazione digitale, in formato raster, della distribuzione dei punti con la loro relativa quota in un territorio e riproduce fedelmente l’andamento della superficie terrestre senza tener conto della vegetazione presente. In questo caso, è stato possibile fornire alla ricostruzione tridimensionale creata l’esatta posizione geografica e la scala di riferimento nel mondo reale impostando il sistema di coordinate geografiche WGS84 UTM 32N.

La risoluzione di ogni DTM è stata portata fino a 0,5 cm, tuttavia, sono stati riscontrati alcuni problemi causati dall’errore strumentale presente nel GPS. Si è perciò scelto di lavorare con i DTMs a risoluzione di 1 cm, la quale è risultata essere la più idonea al raggiungimento degli scopi previsti da questa tesi. Il metodo utilizzato per l’interpolazione spaziale dei punti è stato il “Natural Neighbor” (Sibson, 1981) che ha permesso di rappresentare una superficie rugosa e molto realistica, utile per i calcoli dei parametri morfometrici influenzati dalle depressioni superficiali presenti nell’area.

Il DTM di Figura 3.7, elaborato con ArcMap in pochi minuti, è stato successivamente utilizzato per il calcolo degli indici morfometrici richiesti, al fine di produrre uno studio dettagliato degli strati superficiali presenti nelle aree analizzate. Attraverso la caratterizzazione morfologica della

superficie delle sei aree sarà possibile raggiungere gli obiettivi proposti da questa tesi, arricchendo la bibliografia scientifica riguardante l'agricoltura conservativa, nella quale manca una vera e propria sezione dedicata all'analisi minuziosa dei parametri geomorfologici delle zone oggetto di studio.

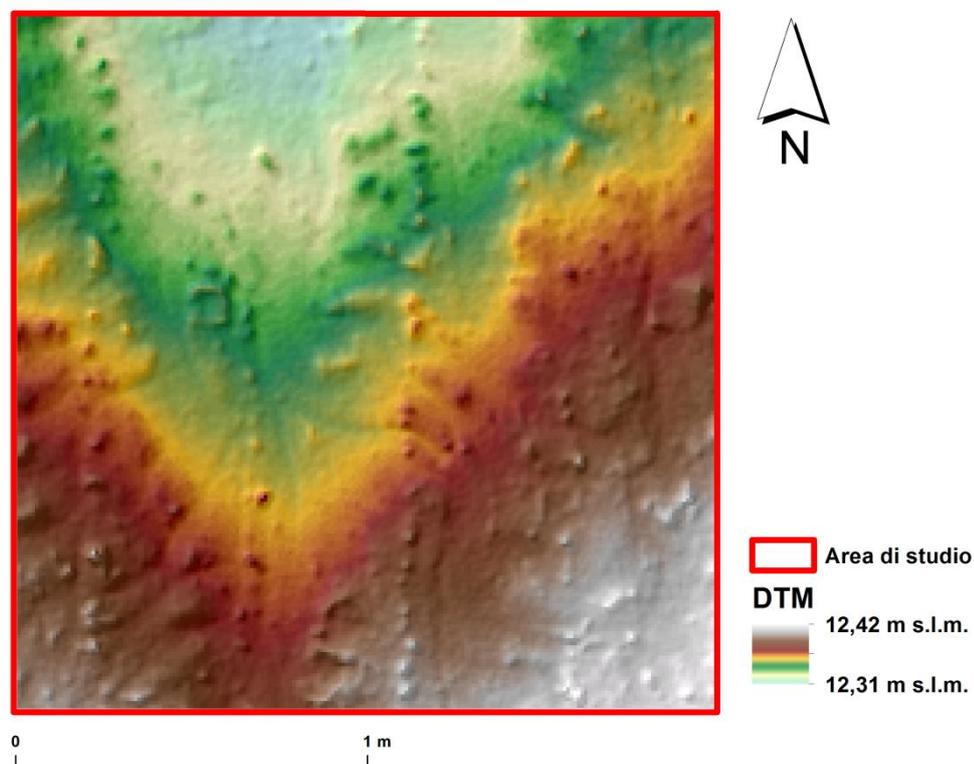


Figura 3.7 Il DTM dell'Area 1NC a risoluzione di 1 cm

Le aree di studio sono quindi sei plots quadrati di dimensioni 2×2 m, i quali corrispondono a delle aree scelte casualmente e, comunque, rappresentative delle caratteristiche presenti nel campo trattato con le tecniche di agricoltura conservativa o convenzionale. Per evitare che questi plots potessero dare vita ad alcuni problemi di calcolo dei parametri morfometrici causati dal cosiddetto “effetto bordo”, cioè una modifica dei reali valori degli indici geomorfologici conseguente all'estrazione di un'area circoscritta all'interno di una superficie più ampia, è stata rilevata anche una zona di contorno, anche definita “buffer zone” in inglese, di circa 50 cm e posta intorno ai quattro lati del plot di riferimento. In questo modo, i risultati ottenuti dal calcolo dei parametri di particolare interesse per il raggiungimento degli obiettivi di questa tesi sono realistici e riproducono fedelmente la vera condizione in cui i plots si trovano, considerando anche tutti i fenomeni erosivi che avvengono all'esterno del quadrato, ma che, comunque, influenzano la situazione presente all'interno dell'area di studio.

3.2 I parametri morfometrici analizzati

3.2.1 La pendenza

Il parametro morfometrico della pendenza per ognuna delle sei aree è stato calcolato con l'utilizzo del comando "Slope" nelle "Spatial Analyst Tools" presenti nella ArcToolBox di ArcMap.

La pendenza viene definita come la massima variazione di altitudine tra una cella e quelle vicine. In altre parole, la pendenza è calcolata come la discesa più ripida per ogni cella di un raster in confronto alle altre otto celle che la circondano (Figura 3.8).

Ogni cella perciò possiede una specifica pendenza che può essere rappresentata da un valore espresso in gradi o percentuale. Più alto è questo valore, maggiore sarà la pendenza di quel terreno; più basso è questo valore, più pianeggiante sarà il terreno in quello spazio.

La pendenza viene anche definita come la derivata prima della superficie oggetto di analisi (Pirotti e Tarolli, 2010).

L'algoritmo utilizzato da ArcGIS per la costruzione della mappa delle pendenze permette di calcolare i gradi di pendenza di una cella secondo la formula (Esri, 2016):

$$\text{Gradi di pendenza} = \arctan \left(\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2} \right) \times (180/\pi) \quad (3.2)$$

dove dz/dx corrisponde alla variazione di gradiente presente lungo la direzione orizzontale rispetto alla cella di riferimento e dz/dy corrisponde alla variazione di gradiente presente lungo la direzione verticale, come spiegato con le formule (3.3) e (3.4) (Horn, 1981):

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Figura 3.8 Cella centrale "e" contornata dalle otto celle adiacenti e con differenti pendenze (Esri, 2010)

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 \times \text{cellsize}) \quad (3.3)$$

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 \times cellsize) \quad (3.4)$$

dove a, b, c, d, f, g, h , corrispondono alla quota di ogni cella, $cellsize$ corrisponde alla dimensione delle celle del DTM.

Con questa metodologia, ArcMap riesce a calcolare ogni valore di sfumatura e aspetto delle otto celle che si trovano intorno alla cella centrale, permettendo così di utilizzare un'equazione di terzo ordine per la ponderazione delle differenze delle celle di contorno rispetto alla cella centrale al fine di calcolare il valore della pendenza presente in quel preciso punto.

Talvolta, nella costruzione della pendenza, è necessario l'utilizzo di un fattore z , definito "z-factor", essenziale per la correzione dei calcoli quando le unità di misura dei valori di z nella superficie non sono espresse nelle stesse unità di misura del sistema x, y utilizzato per il terreno oggetto di studio. Ad esempio, se l'unità di misura di x e y è il metro, invece l'unità di misura di z è il piede, lo z-factor sarà di 0,3048, visto che 1 ft corrisponde a 0,3048 m.

Oltre all'utilizzo del metodo di Horn con ArcMap, il calcolo della pendenza è stato effettuato anche utilizzando il software informatico LandSerf (LandSerf, 2004), impostando una finestra mobile di varie dimensioni scelte a seconda della grandezza delle features da calcolare e per visualizzare dettagliatamente le caratteristiche geomorfologiche della superficie nei terreni interessati da agricoltura conservativa e in quelli interessati da agricoltura convenzionale. L'equazione utilizzata per il calcolo dei gradi di pendenza nel software LandSerf è:

$$\text{Gradi di pendenza} = \arctan (\sqrt{d^2 + e^2}) \quad (3.5)$$

nella quale

$$\sqrt{d^2 + e^2} = dz/dxy = \sqrt{[(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2]} \quad (3.6)$$

dove dz/dx corrisponde alla variazione di pendenza in orizzontale rispetto alla cella di riferimento e dz/dy corrisponde alla variazione di pendenza in verticale.

Le dimensioni della finestra mobile utilizzata per la misurazione di questo parametro sono state cinque: 5×5, 9×9, 15×15, 31×31 e 45×45 cm. A seconda della taglia degli oggetti da analizzare presenti sulla superficie, cioè le features, la finestra mobile deve avere dimensioni differenti per

evitare problemi di calcolo dovuti ad arrotondamenti eccessivi e rappresentazioni non realistiche della situazione morfologica che si trova nell'area di studio.

La grandezza più opportuna della “finestra mobile”, secondo quanto affermato da Pirotti e Tarolli (2010), deve essere di almeno tre volte la grandezza media delle features presenti nell'area di studio e sempre indicata con un numero dispari, in quanto si fa riferimento alla cella centrale della finestra mobile stessa. Nel nostro caso, le features, cioè gli oggetti da analizzare che si trovano nella zona sotto studio, hanno una grandezza che varia dai 10 ai 15 cm, quindi la finestra mobile è stata costruita con grandezze di 31×31 e 45×45 cm. Ulteriori calcoli sono stati effettuati con dimensioni 5×5, 9×9, 15×15 cm per poter confrontare tra di loro i vari risultati ottenuti. La grandezza della finestra mobile non è stata portata oltre i 45×45 cm perché altrimenti la superficie sarebbe risultata troppo smussata e quindi poco rappresentativa delle reali condizioni presenti nel terreno.

3.2.2 La mappa delle ombre

In ArcMap, è possibile utilizzare il comando “Hillshade”, che si trova nelle “Spatial Analyst Tools” presenti nella ArcToolBox, per rappresentare la mappa delle ombre delle sei aree di studio.

La mappa delle ombre per ciascun DTM è stata costruita grazie al calcolo della pendenza e dell’aspetto, i quali hanno permesso di conoscere anche i valori di altitudine, azimut e zenit della fonte d’illuminazione.

L’altitudine è l’inclinazione della sorgente d’illuminazione sopra l’orizzonte. L’unità di misura per questa variabile è il grado e può avere valori compresi tra 0° (all’orizzonte) e 90° (perfettamente sopra la testa dell’osservatore).

L’azimut è la direzione angolare del Sole, misurata in gradi partendo da Nord (0°) e spostandosi in senso orario. I suoi valori sono perciò compresi tra 0° e 360°. Un azimut di 90° si trova in direzione Est.

Nel caso in cui la sorgente luminosa sia il Sole, l’altitudine e l’azimut di default sono rispettivamente impostati su 45° e 315°.

Lo zenit è definito come il punto immaginario d’intersezione tra la linea perpendicolare al piano dell’orizzonte passante per l’osservatore e la superficie dell’emisfero celeste visibile. L’angolo definito dallo zenit e quello dell’altitudine sono complementari, perciò la loro somma è di 90°.

L’aspetto è un parametro che viene calcolato secondo l’algoritmo rappresentato nella formula (3.11) e può assumere un valore da 0 a 2 π , dove 0 corrisponde al punto cardinale Est.

I valori di altitudine, azimut e zenit sono solitamente espressi in gradi, perciò è stato effettuato un ulteriore passaggio per convertire tali dati in radianti, cioè l’unità di misura richiesta dal comando “Hillshade” per la creazione della mappa delle ombre secondo il logaritmo seguente (Esri, 2016):

$$\text{Mappa delle ombre} = 255 \times ((\cos(\text{Zenith_rad}) \times \cos(\text{Slope_rad})) + (\sin(\text{Zenith_rad}) \times \sin(\text{Slope_rad}) \times \cos(\text{Azimuth_rad} - \text{Aspect_rad}))) \quad (3.7)$$

dove:

$$\text{Zenith_rad} = (90 - \text{Gradi di Altitudine}) \times \pi / 180 \quad (3.8)$$

$$Azimuth_rad = (360 - \text{Gradi di Azimut} + 90) \times \pi / 180 \quad (3.9)$$

$$Slope_rad = \arctan (z\text{-factor} \times \sqrt{([dz/dx]^2 + [dz/dy]^2)}) \quad (3.10)$$

If $[dz/dx]$ is non-zero:

$$Aspect_rad = \arctan2 ([dz/dy], -[dz/dx])$$

if $Aspect_rad < 0$ then

$$Aspect_rad = 2 \times \pi + Aspect_rad$$

If $[dz/dx]$ is zero:

if $[dz/dy] > 0$ then

$$Aspect_rad = \pi / 2$$

else if $[dz/dy] < 0$ then

$$Aspect_rad = 2 \times \pi - \pi / 2$$

else

$$Aspect_rad = Aspect_rad$$

(3.11)

È importante sottolineare che, qualora il risultato della “Mappa delle ombre” risulti minore di 0, il valore della cella di output sarà uguale a 0.

3.2.3 La curvatura

Utilizzando il programma LandSerf, è stato calcolato il parametro relativo alla curvatura media, “mean curvature” in inglese, presente in ciascuna delle sei aree. Oltre a ciò, sono stati misurati anche i valori per la curvatura minima e massima di ogni area. Queste curvatures sono considerate le curvatures principali della superficie analizzata (Moore et al., 1991).

I valori delle curvatures possono essere utilizzati, dal punto di vista pratico, per descrivere le caratteristiche fisiche del territorio di un bacino idrologico, con l'obiettivo di comprendere dove ci sia accelerazione e decelerazione dei flussi di runoff che provocano fenomeni di erosione e depositi di vario materiale. Secondo Tarolli et al. (2009), con questo metodo è possibile risalire alle pendenze, all'aspetto e alle varie curvatures presenti in un territorio per evidenziare le cause principali dell'erosione e dei cambiamenti geomorfologici.

In letteratura esistono ben 17 differenti modalità per il calcolo della curvatura, tuttavia i due metodi più utilizzati, in base alle caratteristiche geometriche della superficie da analizzare, sono il calcolo della curvatura del profilo e quello della curvatura del piano (Gallant e Wilson, 2000).

La curvatura del profilo viene definita come la curvatura della superficie nella direzione di discesa più ripida, facendo riferimento al tasso di variazione della pendenza. Il calcolo di questa curvatura è utile per evidenziare i rilievi concavi e convessi presenti nell'area del DTM, infatti, un valore negativo indica una curvatura della superficie con convessità verso l'alto, invece un valore positivo indica concavità verso l'alto. Nel caso in cui il valore della curvatura corrisponde a 0, allora la superficie viene detta lineare (Figura 3.9).

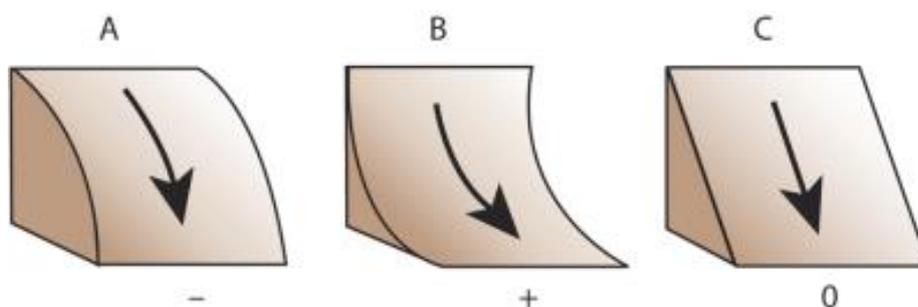


Figura 3.9 Rappresentazione grafica della curvatura del profilo con valore negativo (A), positivo (B) e uguale a zero (C) (Esri, 2010)

Invece, la curvatura del piano è la curvatura che si può trovare in un contorno disegnato perpendicolarmente alla direzione di massima pendenza attraverso la cella centrale della finestra mobile. Questa curvatura permette di descrivere il tasso di cambiamento dell'aspetto nel piano di tutta la superficie interessata e può essere utile nella definizione delle linee di fondovalle, nella localizzazione delle creste e nell'identificazione dei percorsi del flusso. Il calcolo di questo

parametro dipende dalla convergenza e dalla divergenza del flusso attraverso la superficie, perciò con un valore positivo si indica una superficie lateralmente convessa alla cella di riferimento, con un valore negativo si indica una superficie che è lateralmente concava alla cella stessa, con un valore della curvatura pari a zero si dichiara che la superficie sotto analisi è lineare, come nel caso della curvatura del profilo (Figura 3.10).

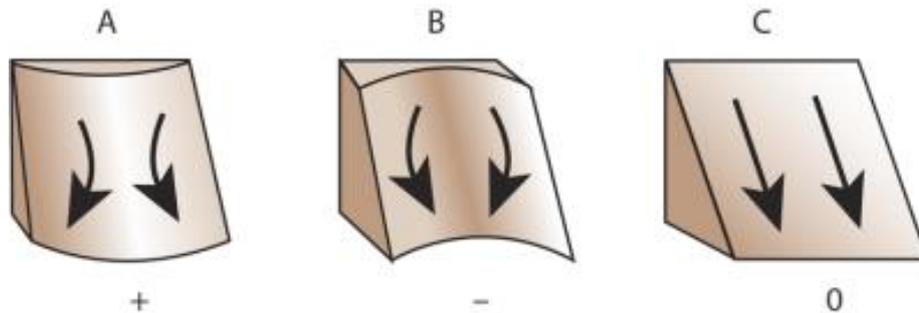


Figura 3.10 Rappresentazione grafica della curvatura del piano con valore positivo (A), negativo (B) e uguale a zero (C) (Esri, 2010)

Anche per il calcolo della curvatura con il software LandSerf si è dovuto decidere quale fosse la dimensione più opportuna per la costruzione della finestra mobile. In questo caso, come per il calcolo della pendenza, la finestra mobile è stata impostata a diverse dimensioni (5×5, 9×9, 15×15, 31×31 e 45×45 cm), tuttavia ci si è accorti che la grandezza migliore della finestra mobile è 45×45 cm, in accordo con quanto affermato da Pirotti e Tarolli (2010) e come spiegato nel capitolo 4.

In LandSerf, la curvatura di un DTM viene calcolata cella per cella (Figura 3.11) partendo da un polinomio di quarto grado (Evans, 1979):

$$Z = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F \quad (3.12)$$

che è adatto a una superficie composta da una finestra di celle 3×3. I valori di x , y e Z corrispondono alle coordinate locali del sistema di riferimento e A , B , C , D , E e F sono i sei coefficienti di secondo grado dell'equazione (3.12).

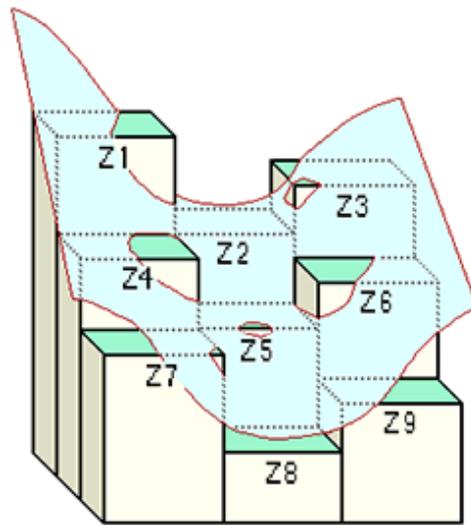


Figura 3.11 Rappresentazione del calcolo della curvatura di un DTM cella per cella (Esri, 2010)

Il risultato della curvatura è la derivata seconda della superficie oggetto d'analisi, quindi, la pendenza della pendenza. Per misurare la curvatura massima (C_{\max}) e la curvatura minima (C_{\min}), Evans utilizzava le formule:

$$C_{\max} = -A - B + \sqrt{((A - B)^2 + C^2)} \quad (3.13)$$

$$C_{\min} = -A - B - \sqrt{((A - B)^2 + C^2)} \quad (3.14)$$

L'algoritmo utilizzato nel programma LandSerf, è stato creato da Wood (1996), il quale elaborò le equazioni (3.13) e (3.14), per adattarele a una finestra mobile costituita da un qualsiasi numero di celle e con coordinate locali definite a partire dalla cella centrale. Le equazioni (3.13) e (3.14) diventano pertanto:

$$C_{\max} = n \times g [-A - B + \sqrt{((A - B)^2 + C^2)}] \quad (3.15)$$

$$C_{\min} = n \times g [-A - B - \sqrt{((A - B)^2 + C^2)}] \quad (3.16)$$

dove g è la risoluzione del DTM e n corrisponde alla dimensione della finestra mobile.

In questo modo si può trovare il valore della curvatura media (C_{media}) attraverso il calcolo della formula:

$$C_{\text{media}} = (C_{\text{max}} + C_{\text{min}}) / 2 \quad (3.17)$$

La curvatura media è definita come la media aritmetica di tutte le curvature del piano passanti in un preciso punto della superficie, pertanto il suo valore dipende dal modo in cui la superficie è posta nello spazio.

Infatti, secondo quanto affermato da Eulero, in ogni punto di una superficie, la curva d'intersezione tra la superficie e un qualsiasi piano contenente la retta normale alla superficie passante per il punto suddetto, ha una determinata curvatura (ρ) ed un raggio di curvatura (R) definito dall'equazione:

$$R = 1 / \rho \quad (3.18)$$

Inoltre, per un punto di una superficie può passare un intero fascio di piani contenenti la retta normale, tuttavia solo una è la direzione che permette di avere una curvatura massima (che rispecchia la convessità verso l'alto della superficie) e una curvatura minima (che rappresenta la concavità verso l'alto della superficie).

3.2.4 L'indice di scabrezza superficiale

L'indice di scabrezza superficiale è definito come la deviazione standard dell'elevazione di una finestra mobile, la topografia residua, ed è solitamente calcolato con le funzioni "Focal Statistics" e "Raster Calculator" che si trovano nelle "Spatial Analyst Tools" di ArcMap, come esposto nelle istruzioni di Cavalli et al. (2008). Anche in questo caso, la grandezza della finestra mobile è stata di 5×5, 9×9, 15×15, 31×31 e 45×45 cm per lo stesso motivo esplicitato nel calcolo della curvatura media. Questa funzione permette di ottenere una griglia di valori di output a partire da alcune celle di input scelte in una zona specifica.

L'indice di scabrezza superficiale per una determinata finestra mobile, viene calcolato secondo la formula:

$$RI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^2} (x_i - x_m)^2}{n^2}} \quad (3.19)$$

dove RI è il "Roughness Index", ovvero l'indice di scabrezza superficiale, cioè la deviazione standard della topografia residua, n^2 corrisponde al numero di celle che si trovano all'interno della finestra mobile, x_i è il valore i -esimo della topografia residua di una cella specifica all'interno della finestra mobile, x_m è la media dei valori presenti nelle n^2 celle.

Nel DTM a risoluzione di 1 cm, il valore della scabrezza superficiale risultante per ogni cella esprime la variabilità topografica su scale di lunghezza che variano da 1 cm (dimensione della singola cella) a 45 cm (dimensione della finestra in movimento). La dimensione della finestra mobile viene calcolata sulla base della grandezza delle features che si trovano sull'area di studio ed è sempre rappresentata da un numero dispari poiché fa riferimento alla cella centrale della finestra mobile stessa. In questo caso, le dimensioni variano all'interno di un intervallo di valori tali da fornire importanti informazioni a seconda dell'obiettivo preposto per lo studio, cioè l'analisi dell'indice di scabrezza negli strati superficiali dei terreni coltivati con tecniche tradizionali e in quelli lavorati con tecniche conservative.

L'indice di scabrezza superficiale influenza intensamente la velocità del deflusso e il relativo trasporto di sedimenti; infatti, se il tasso di scabrezza della superficie è elevato allora la formazione di canali di runoff e la loro relativa capacità di erosione vengono fortemente limitati;

al contrario, in una superficie liscia, l'erosione idrica e la creazione di canali di ruscellamento superficiale risulterà agevolata.

3.2.5 L'indice di connettività

Per il calcolo dell'indice di connettività, l'analisi si è soffermata anche sulla zona di contorno, detta "buffer zone", dei sei quadrati 2×2 m rappresentativi delle aree esaminate.

L'indice di connettività è un ulteriore parametro analizzato per la caratterizzazione morfologica della superficie delle sei aree scelte. La misurazione dell'indice di connettività si basa sul fatto che una certa quantità di materiale presente in una zona può raggiungere un'altra zona con una probabilità che dipende da due fattori: la quantità di materiale presente all'origine e le caratteristiche del percorso che tale materiale deve compiere. Se un sistema mostra un'elevata probabilità che ci possa essere un trasferimento di grandi masse di materiale da una zona verso un'altra, allora questo sistema sarà caratterizzato da un grado di connettività elevato (Borselli et al., 2008).

Nello specifico, l'indice di connettività può essere definito come una stima della potenziale connessione tra il sistema di deflusso superficiale e i sedimenti erosi in una precisa zona.

La connettività idrologica viene definita come un legame esistente tra la fonte dei sedimenti e del runoff nella parte superiore del bacino idrologico e la rispettiva area di arrivo alla base, nel cosiddetto "fondovalle". Essa può essere diretta, nel caso in cui l'acqua segue i canali e i fossati già presenti, oppure indiretta, quando si creano percorsi secondari a causa del ruscellamento superficiale (Croke et al., 2005).

La determinazione di questo indice è data dall'analisi delle componenti che, più di tutte, condizionano la connettività idrologica presente nella zona. I fattori che influenzano la connettività sono: l'uso del suolo (la tipologia delle tecniche di agricoltura utilizzate, l'intervallo di tempo trascorso dall'ultima lavorazione effettuata), la pendenza presente nella zona di studio, la morfologia della superficie analizzata, le proprietà del suolo (la stabilità degli aggregati, la capacità d'infiltrazione, la durezza), l'ampiezza dell'area di riferimento, l'intensità delle precipitazioni atmosferiche che possono modificare sostanzialmente l'aspetto superficiale del suolo in quella zona, la scabrezza presente nel terreno, l'organizzazione spaziale della vegetazione posizionata all'interno dell'area di studio che può modificare i tempi e lo spazio del flusso, la tipologia delle piante che possiedono differenti indici di copertura e quantità di fogliame rilasciato a terra, la pressione antropica presente nel territorio con abitazioni e infrastrutture.

Il calcolo di questo indice viene effettuato attraverso la ricostruzione dell'assetto superficiale presente nei terreni sotto analisi in un sistema GIS; ciò è possibile grazie allo studio delle caratteristiche morfologiche presenti nel territorio.

La formula che permette di misurare la connettività è la seguente:

$$IC_k = \log_{10} \left(\frac{D_{up,k}}{D_{dn,k}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\overline{W}_k \overline{S}_k \sqrt{A_k}}{\sum_{i=k, n_k} \frac{d_i}{W_i S_i}} \right) \quad (3.20)$$

dove k indica la cella k -esima che possiede quello specifico valore di IC (Index of Connectivity), $D_{up,k}$ e $D_{dn,k}$ indicano rispettivamente la potenziale distanza percorsa dai sedimenti posti nella parte superiore (upslope) e inferiore (downslope) rispetto alla posizione della cella k -esima che si trova sul percorso del flusso.

In particolare D_{up} viene calcolata secondo la formula:

$$D_{up} = \overline{W} \overline{S} \sqrt{A} \quad (3.21)$$

dove W è il fattore adimensionale che indica l'impedimento al trasporto di sedimenti relativo a un segmento della linea di flusso e dipende dalle condizioni idrologiche in cui si trova il suolo di quel bacino, S corrisponde al valore del gradiente di pendenza per una cella posta lungo il percorso e viene indicato con l'unità di misura m/m , A è l'area in m^2 che si trova al di sopra della posizione della cella e contribuisce all'acquisizione dei sedimenti nel flusso.

La formula per il calcolo della D_{dn} è:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (3.22)$$

dove d_i corrisponde alla lunghezza del flusso nella cella i -esima e può assumere due valori entrambi espressi in m , il primo è la lunghezza (l) della cella nel caso di direzione verticale od orizzontale, il secondo è $l\sqrt{2}$ nel caso di movimento lungo la diagonale; W_i è il fattore di impedimento ai processi di runoff con relativo trasporto di sedimenti attribuito alla cella i -esima e varia in base alle caratteristiche superficiali presenti nella zona (scabrezza, vegetazione,

proprietà del suolo, tecniche di coltivazione); S_i indica il grado di pendenza misurato in m/m nella cella i -esima.

La sommatoria delle caratteristiche di tutte le celle presenti nell'area sottostante rispetto a una cella specifica che si trova sul percorso del flusso, permette la stima della distanza potenziale D_{dn} che i sedimenti sono in grado di percorrere.

Una particolare descrizione merita il fattore di ponderazione W , presente sia nella formula (3.20) sia nelle formule (3.21) e (3.22). Il suddetto fattore, detto “weighting factor” in inglese, rappresenta gli impedimenti al deflusso superficiale e al movimento dei sedimenti causati dalle condizioni locali di uso del suolo e dalle caratteristiche morfologiche del terreno all'interno di un bacino idrologico. Proprio per questo motivo, il valore di W varia in relazione alle caratteristiche facilmente osservabili e misurabili in ogni punto di un territorio a qualsiasi pendenza e relative alle modalità di gestione del suolo, a partire dalla parte superiore fino a quella inferiore della zona sotto osservazione. Il calcolo di questo fattore è possibile con la formula seguente:

$$W = 1 - \left(\frac{RI}{RI_{MAX}} \right) \quad (3.23)$$

dove RI_{MAX} è il valore massimo assunto da RI , l'indice di scabrezza superficiale, all'interno dell'area di studio.

In questa tesi, l'indice di connettività viene calcolato rispetto ai bordi di ciascuno dei sei quadrati 2×2 m corrispondenti alle aree di studio. All'inizio di questa operazione è necessario creare una zona buffer intorno al contorno del quadrato, perciò si utilizza il comando “Buffer” nelle “Analysis Tools” della ArcToolBox. È necessario scegliere una grandezza del buffer che sia in accordo con gli scopi previsti dalla ricerca; in questo caso si è scelto un valore 4×4 cm.

Inoltre, è stato utilizzato, anche il software SedInConnect (SedInConnect, 2016) che permette la rappresentazione grafica delle zone in cui la connettività presenta valori elevati e quelle in cui si hanno, al contrario, condizioni di connettività bassa. Abilitando l'opzione “Use W (Cavalli et al., 2013) as Impedance of” durante il processo di produzione della ricostruzione grafica dell'indice suddetto, si permette al programma di tenere in considerazione anche la scabrezza presente nella superficie della porzione d'area analizzata come impedimento alla connettività da ricercare (Cavalli et al., 2013; Crema et al., 2015).

I risultati relativi all'indice di connettività di ciascuna area permettono di conoscere la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale del terreno in uno specifico sistema agrario,

rendendo possibile l'applicazione di misure di mitigazione che limitino le problematiche derivanti dal trasferimento del suolo da una parte del campo agrario in altre zone meno utili. Infatti, uno studio approfondito di questo parametro può fornire dei modelli predittivi utili all'aumento dell'efficienza d'uso idrica delle colture e alla creazione di misure di conservazione contrarie all'erosione del suolo e al trasporto dei sedimenti.

3.2.6 Le direzioni del flusso

È stato possibile rappresentare anche le direzioni del deflusso, in inglese “flow directions”, con l’uso delle “TauDEM Tools” (TauDEM, 2016) integrabili alla ArcToolBox presente nel software ArcMap. Si tratta di un insieme di “Tools” che comprende varie funzioni di tipo idrologico e che permette di rimuovere le depressioni locali posizionandole alla stessa altezza della superficie di contorno al fine di ottenere le direzioni virtuali del flusso presente nell’area sotto osservazione.

Il DTM originale, cioè quello nel quale sono ancora presenti gli avvallamenti superficiali, mostra la condizione realistica del deflusso superficiale; tuttavia il DTM “depittato”, ossia quello virtuale ottenuto con TauDEM e privo delle depressioni locali, viene utilizzato per meglio descrivere visivamente il percorso attraversato dall’acqua fino alla linea di fondovalle, evitando anche l’influenza negativa di eventuali buchi causati da un’errata ricostruzione tridimensionale delle parti di terreno oggetto di analisi. In questo modo è possibile osservare i piccoli canali superficiali che l’acqua di ruscellamento, cioè quella che non s’infiltra nel terreno ma scivola su di esso, percorre in situazioni di abbondanti precipitazioni. Con questo metodo, inoltre, si può trovare anche l’esatta posizione dell’outlet, ovvero il punto principale verso il quale confluiscono i percorsi scavati nel tempo dall’acqua di deflusso presente sull’intera area superficiale, in modo da poter anche provvedere all’adozione di eventuali modifiche al tipo di sistemazione agraria della superficie qualora questa potesse risultare utile a ridurre i problemi causati dal fenomeno di runoff.

I flussi possono essere suddivisi in tre tipologie a seconda del loro percorso, come descritto dalle linee guida di ArcGIS. I flussi a direzione determinata possono essere rilevati in maniera univoca quando si conoscono tutte le caratteristiche superficiali di quel territorio (tipo di connettività, posizione della sorgente di runoff e dell’area di deposito dei materiali, caratteristiche delle features). I flussi a direzione indeterminata, invece, si possono riscontrare sul terreno nel caso in cui la direzione del flusso non possa essere determinata univocamente. Solitamente, questa tipologia si trova in percorsi chiusi o con loop, dove sono presenti più fonti di ruscellamento e molte aree di fondovalle, spesso coincidenti tra loro, oppure le features possiedono proprietà che causano movimenti circolari. Infine, i flussi con direzione non inizializzata sono quelli isolati, in cui la sorgente e la foce del flusso principale non si trovano all’interno dell’area oggetto di studio.

La determinazione delle “flow directions” richiede un file raster di input corrispondente alla superficie da analizzare, al fine di poter produrre un file raster di output con i risultati della direzione del flusso presente in ogni cella.

Tarboton (1997) ha prodotto una nuova metodologia, chiamata D_∞ (D-Infinity perché considera un numero infinito di possibili direzioni di flusso), utilizzata in ArcGIS per il calcolo delle direzioni del flusso presenti in ogni singola cella. Questo nuovo sistema ha sostituito i vecchi metodi come: D8 (8 flow Directions) (O'Callaghan e Mark, 1984), ovvero il metodo più semplice usato per la definizione della direzione del flusso di ogni cella verso una delle altre otto celle confinanti con essa; MS (Multiple directions based on Slope), prodotto da Fairfield e Leymarie (1991) per scoprire facilmente il percorso del flusso scegliendolo tra tutte le molteplici direzioni possibili, in base alla pendenza maggiore verso le celle adiacenti; il logaritmo creato inizialmente da Lea (1992) e perfezionato da Costa-Cabral e Burges (1994), chiamato DEMON (Digital Elevation Model Network), che identifica continuamente la direzione del flusso indicandola con un angolo compreso tra 0 e 2π .

Tutti i metodi citati presentano però degli svantaggi: il metodo D8 ha riscontrato numerose problematiche durante il calcolo delle flow directions perché permetteva di tenere conto della direzione di flusso solamente in otto possibili direzioni separate tra loro da 45° ; MS possiede un errore di dispersione causato dal fatto che il flusso da una cella verso le altre con elevazione maggiore si dissolveva verso più direzioni; DEMON, sebbene permetta di non avere effetti di dispersione indesiderati, produce degli errori causati dalle approssimazioni effettuate durante la fase di montaggio del piano lungo quattro punti principali.

Il metodo D_∞ , dunque, risulta essere il migliore tra quelli riportati, visto che viene determinato in base alla direzione della pendenza più ripida verso il basso, ottenuta tramite otto sfaccettature triangolari costruite in una finestra di 3×3 pixels e posizionate con il vertice sul centro della cella di riferimento (Figura 3.12).

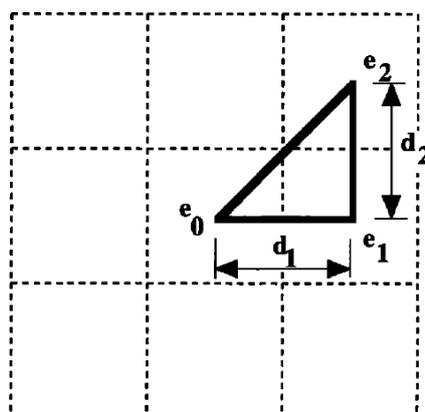


Figura 3.12 Costruzione delle sfaccettature triangolari con le relative variabili nella finestra di celle 3×3 (Tarboton, 1997)

La realizzazione di facce triangolari con questo metodo evita errori di calcolo dovuti ad approssimazioni e dispersioni. Inoltre, il flusso non segue soltanto le principali direzioni verticali, orizzontali e diagonali descritte dai metodi precedenti. Infatti, in questo caso, il senso del deflusso è calcolato dalla ripartizione del flusso stesso che, partendo dalla cella interessata, si muove verso le due celle adiacenti, che si trovano lungo la linea di pendenza, con una direzione definita dall'ampiezza dell'angolo di flusso rispetto all'angolo diretto presente nel centro del pixel principale. Ciò permette di salvare un solo numero relativo all'andamento del flusso per ciascuna cella, così da avere un'archiviazione informatica semplice, veloce ed efficiente.

Per di più, gli effetti di dispersione sono ridotti al minimo poiché la direzione del flusso non fa mai riferimento a più di due celle lungo il pendio.

Le misurazioni previste dal metodo D_{∞} prevedono inizialmente il calcolo dei due vettori della pendenza s_1 e s_2 secondo le formule seguenti che utilizzano le variabili descritte in Figura 3.12:

$$s_1 = (e_0 - e_1) / d_1 \tag{3.24}$$

$$s_2 = (e_1 - e_2) / d_2 \tag{3.25}$$

dove e_0 , e_1 ed e_2 corrispondono all'elevazione delle rispettive celle, d_1 e d_2 corrispondono alla distanza tra le due celle di riferimento.

La direzione del flusso nella singola sfaccettatura triangolare d'interesse (r) e la sua relativa quantità (s) vengono calcolate secondo le formule:

$$r = \tan^{-1} (s_2 / s_1) \tag{3.26}$$

$$s = \sqrt{(s_1^2 + s_2^2)} \tag{3.27}$$

dove s_1 e s_2 sono i due vettori della pendenza precedentemente calcolati.

Qualora il risultato della direzione del flusso non rientri nell'intervallo tra gli angoli 0 e $\tan^{-1} (d_2 / d_1)$, i parametri r e s saranno calcolati in modo diverso a seconda dei valori di r ottenuti:

$$\text{se } r < 0, \text{ allora } r = 0 \text{ e } s = s_1 \quad (3.28)$$

$$\text{se } r > \tan^{-1}(d_2/d_1), \text{ allora } r = \tan^{-1}(d_2/d_1) \text{ e } s = (e_0 - e_2) / \sqrt{(d_1^2 + d_2^2)} \quad (3.29)$$

dove r definisce la direzione del flusso nella sfaccettatura triangolare di interesse, s corrisponde alla quantità di deflusso presente, d_1 e d_2 sono le distanze tra le celle, e_0 e e_2 sono le elevazioni delle celle riportate in Figura 3.12.

Nella Tabella 3.2 sono riportati i dati relativi alle elevazioni corrispondenti ai tre vertici di ognuna delle sfaccettature triangolari utilizzati per calcolare le pendenze e gli angoli nelle formule (3.24), (3.25) e (3.29). Questi valori sono organizzati in modo tale che e_0 corrisponde all'elevazione del punto centrale, e_1 si riferisce alla cella laterale a quella di riferimento, e_2 coincide con l'elevazione della cella posta in diagonale rispetto alla cella centrale e confinante con quest'ultima.

Tabella 3.2 I valori delle variabili e e a utili al calcolo della direzione del flusso (Tarboton, 1997)

N°sfaccettatura	1	2	3	4	5	6	7	8
e_0	e_{ij}							
e_1	e_{ij+1}	e_{i-1j}	e_{i-1j}	e_{ij-1}	e_{ij-1}	e_{i+1j}	e_{i+1j}	e_{ij+1}
e_2	e_{i-1j+1}	e_{i-1j+1}	e_{i-1j-1}	e_{i-1j-1}	e_{i+1j-1}	e_{i+1j-1}	e_{i+1j+1}	e_{i-1j+1}
a_c	0	1	1	2	2	3	3	4
a_f	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

I parametri a_c e a_f vengono utilizzati nella formula (3.30) per il calcolo dell'angolo della direzione percorsa dal flusso nella cella (r_g) che viene costruito in senso antiorario dalla direzione verso Est, partendo dalla sfaccettatura triangolare 1 e proseguendo fino alla 8, con un'ampiezza definita dalla formula:

$$r_g = a_f r' + a_c \pi/2 \quad (3.30)$$

dove r' è l'angolo con pendenza maggiore considerato all'interno delle otto sfaccettature della cella, le costanti a_c e a_f variano a seconda della sfaccettatura di riferimento e hanno valori descritti nella Tabella 3.1.

Nel caso in cui le sfaccettature abbiano la stessa pendenza allora si sceglierà la prima in ordine cronologico, tuttavia questa situazione accade raramente in natura, perciò l'errore bias viene ritenuto trascurabile.

3.2.7 L'area drenata

L'area drenata viene comunemente definita come la porzione della zona che si trova a monte di un elemento presente nella topografia superficiale del terreno estendendosi fino alla rispettiva linea dello spartiacque e che contribuisce al drenaggio in quello stesso punto.

Generalmente, l'area drenata viene fatta corrispondere lungo le direzioni di deflusso con l'obiettivo di indicare l'intensità più o meno elevata dei valori relativi all'erosività del flusso (Marchi e Dalla Fontana, 2005).

Questo parametro viene calcolato successivamente all'ottenimento dei giusti valori della direzione del flusso per ogni area di studio.

Ciò permette di considerare anche il fatto che l'analisi di tale indice morfometrico è dipendente dalla scelta del metodo e degli algoritmi con cui sono state misurate le direzioni del flusso. In questo caso, infatti, la funzione utilizzata per il calcolo dell'area drenata è stata "D-Infinity Contributing Area", in accordo con il metodo D_{∞} utilizzato per il calcolo delle direzioni di flusso nel sottocapitolo 3.2.6.

Nel caso in esame, la rappresentazione dell'area drenata presente in ogni area di studio è stata calcolata secondo una scala logaritmica, al fine di poter meglio comprendere le differenti grandezze relative all'importanza del bacino specifico per ogni flusso. Nella Figura 3.12 è rappresentata l'area drenata per l'Area 1C, calcolata secondo la scala logaritmica in base 10.

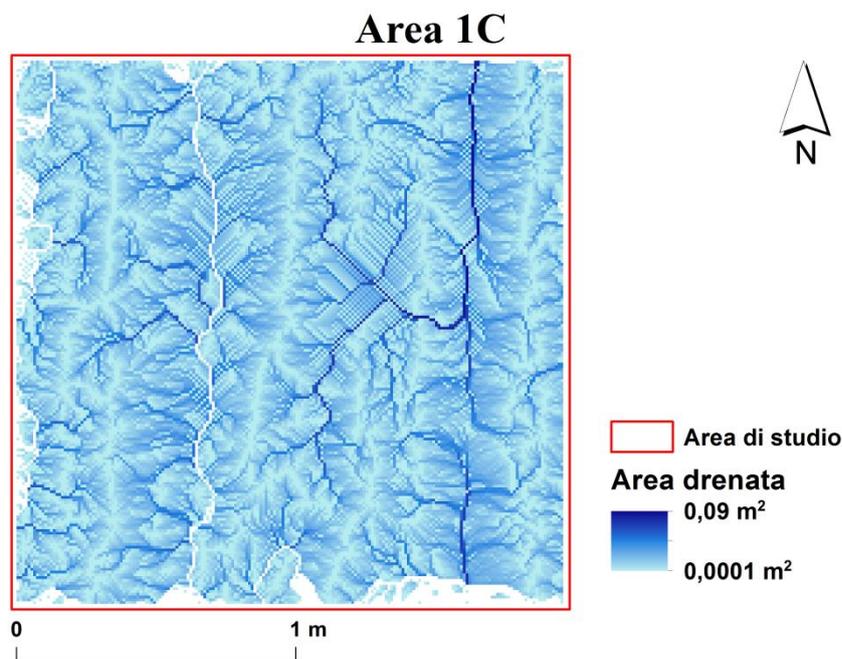


Figura 3.13 Rappresentazione dell'area drenata nell'Area 1C

3.3 Analisi Statistica

Utilizzando il software MATLAB, abbreviazione di Matrix Laboratory (MathWorks, 2016), è stato possibile effettuare anche un'analisi statistica dei valori di media, massimo, minimo, mediana, deviazione standard e indice di asimmetria relativi all'indice di scabrezza superficiale, all'indice di connettività e alla curvatura media, ottenuti attraverso le elaborazioni grafiche delle sei aree di riferimento. I risultati sono stati suddivisi nei relativi boxplots di colore azzurro con il limite superiore corrispondente al venticinquesimo percentile e il limite inferiore corrispondente al settantacinquesimo percentile del gruppo di campioni presi in esame.

La linea rossa che si visualizza al centro di ogni box rappresenta il valore della mediana dei campioni analizzati. Nel caso in cui la mediana non risulta essere centrata all'interno del box, allora si calcola l'indice di asimmetria del campione, detto "skewness".

I valori anomali che vengono considerati outlier quando superano di 1,5 volte l'intervallo interquartile della parte superiore o inferiore dei boxplots, sono contrassegnati da un simbolo "+" di colore rosso.

Nella Figura 3.14 è rappresentato il boxplot relativo all'indice di scabrezza superficiale nell'Area 1C.

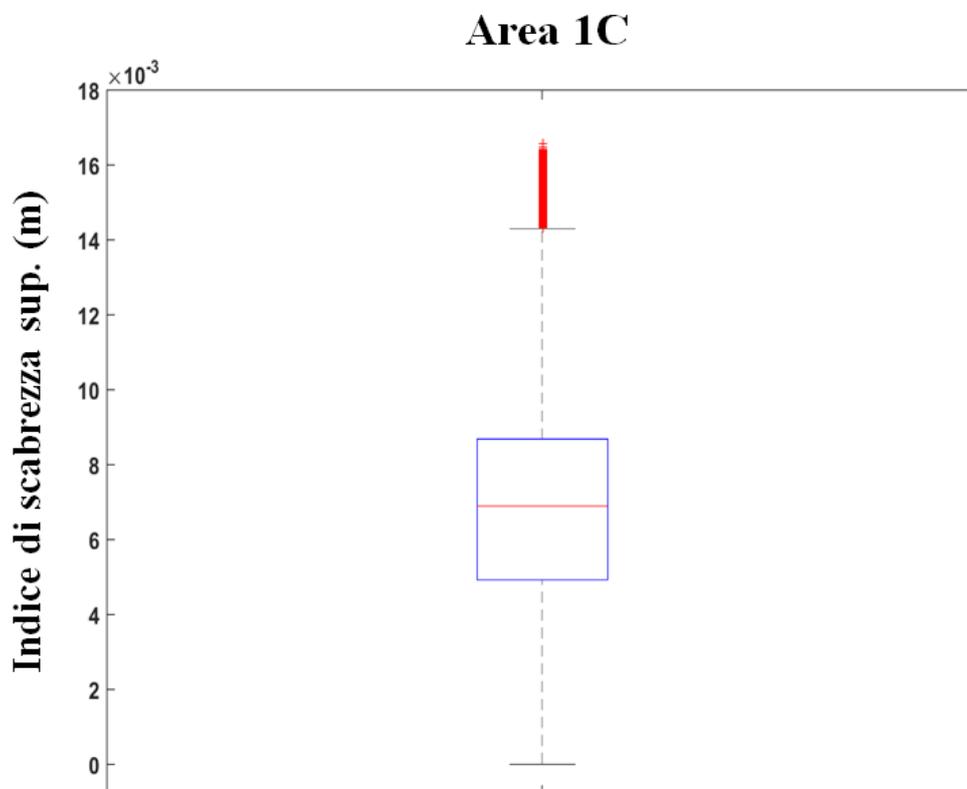


Figura 3.14 Boxplot dell'indice di scabrezza superficiale nell'Area 1C

I valori degli indici calcolati per i tre parametri geomorfologici di ognuna delle sei aree sono stati calcolati per effettuare un'analisi di tipo statistico dei dati ottenuti.

In questa maniera è stato possibile confermare se le affermazioni fatte osservando i risultati degli indici morfometrici studiati per ogni area fossero statisticamente veritiere e rappresentative della situazione geomorfologica reale.

4. Risultati e discussione

La conversione dei terreni interessati da lavorazioni agricole tradizionali a quelle più rispettose dell'ambiente e previste dall'agricoltura conservativa, richiede dei tempi di trasformazione lunghi; questo è anche uno dei motivi che molti agricoltori utilizzano per giustificare il loro rifiuto verso una tecnica che richiede la perdita di gran parte delle rese nei primi anni di adozione con i relativi costi iniziali elevati.

Proprio per questo motivo, ci si aspetterebbe di riscontrare poca differenza tra i valori ottenuti tramite le elaborazioni grafiche e le analisi statistiche delle sei aree analizzate, a causa del fatto che le tre aree presenti all'interno del campo sottoposto ad agricoltura conservativa, sono interessate da no-tillage solamente da circa un anno e mezzo, cioè un periodo di tempo troppo corto per poter riscontrare significative differenze morfologiche, strutturali e tessiturali della superficie tra i due sistemi agrari comparati tra loro. Infatti, secondo quanto affermato nel capitolo introduttivo di questa tesi, l'agricoltura conservativa non modifica in tempi relativamente brevi le caratteristiche del terreno su cui viene utilizzata, bensì ha bisogno di un periodo lungo più di qualche anno.

Negli anni a venire, ci si aspetta che lo sviluppo della macroporosità presente nelle zone interessate da agricoltura conservativa, in cui la scabrezza superficiale risulta essere mediamente maggiore rispetto a quelle lavorate con tecniche convenzionali (Talarico, 2009), aumenti l'infiltrazione dell'acqua nel terreno e la stabilità degli aggregati riducendo i fenomeni di runoff e il rischio di erosione del suolo.

Lo sviluppo della capacità d'infiltrazione delle acque non crea solo miglioramenti al suolo che ne è interessato, infatti, ciò può aumentare anche la quantità di acqua che dà vita ai flussi sottosuperficiali. Questo tipo di movimento, caratteristico soprattutto dei campi coltivati secondo la tecnica conservativa di strip-tillage, che prevede lavorazioni della superficie nelle file di semina lasciando inalterate le zone d'interfila, produce importanti perdite di erbicida a livello sottosuperficiale poiché l'acqua penetra nelle zone prive di residui colturali e pronte per la semina, ma contemporaneamente le limita di circa 10 volte a livello superficiale, se confrontate con le tecniche convenzionali (Potter et al., 2015).

Secondo Kurothe et al. (2014), la lavorazione ridge-tillage è la migliore per favorire l'accumulo e la conservazione di acqua piovana direttamente sul campo agrario attraverso il miglioramento delle condizioni fisiche del suolo e l'aumento della capacità d'infiltrazione superficiale.

L'adozione delle tecniche di lavorazione che prevedono l'utilizzo della pacciamatura e vengono definite anche "mulching-tillage", permette di ridurre le perdite d'acqua per runoff ed evaporazione, protegge il suolo dall'impatto diretto delle gocce di pioggia naturale o di

irrigazione, aumenta la biodiversità e la disponibilità di nutrienti. Infatti, Prosdocimi et al. (2016) hanno dimostrato, in un vigneto della Spagna, che l'applicazione della pacciamatura con paglia riduce mediamente del 25,31% i fenomeni di runoff e fino al 77,79% le perdite di suolo causate da ruscellamento superficiale.

Le tecniche di no-tillage non sempre producono solamente effetti benevoli per il campo agrario e per l'ambiente. È il caso di terreni coltivati con cereali e che si trovano in condizioni di semi-aridità, in cui si può creare compattamento degli strati superficiali, l'erosione del suolo non è sufficientemente mitigata e il contenuto di acqua trattenuta nel suolo fino a 80 cm di profondità può essere minore del 26% rispetto alle tecniche convenzionali. In più, l'umidità del suolo nei campi lavorati con conservation-tillage presenta valori che si trovano all'interno dell'intervallo delimitato da un minimo di -8,7% a un massimo di +12%, in confronto alle tecniche di agricoltura convenzionale (Lopez et al., 1999).

Perciò risulta evidente la necessità di considerare l'effettiva applicabilità dell'agricoltura conservativa nelle varie zone di interesse agrario, effettuando delle misurazioni distinte che tengono conto delle effettive condizioni climatiche e pedologiche presenti in un preciso territorio, al fine di stimare la massima efficienza energetica e le possibilità di sviluppo economico che potrebbero essere fornite dalla conversione delle tecniche di coltivazione convenzionali in quelle previste dall'agricoltura conservativa.

I valori degli indici morfometrici calcolati, permettono di ottenere importanti informazioni riguardanti le modifiche subite dai terreni coltivati secondo le tecniche di agricoltura convenzionale, in cui il suolo viene lavorato periodicamente con arature profonde, e quelle previste dalla semina su sodo, detta anche no-tillage, in cui il campo è solamente interessato dal passaggio dei macchinari utili per le operazioni di semina, raccolta e diserbo.

Le sei aree analizzate in questa tesi tramite la fotogrammetria SfM sono state utilizzate per lo studio dettagliato degli indici morfologici ritenuti di particolare interesse per le finalità previste dal capitolo 1.5.

I valori della pendenza, della mappa delle ombre, della curvatura minima, della curvatura massima, della curvatura media, dell'indice di scabrezza superficiale, dell'indice di connettività, delle direzioni del flusso e dell'area drenata sono stati rappresentati, esaminati e discussi nei sottocapitoli seguenti.

4.1 La pendenza

La pendenza calcolata per ognuna delle sei aree ha permesso di comprendere la posizione dei punti di depressione più o meno profondi presenti su tutta l'area superficiale. Nella Figura 4.1 sono stati riportati i risultati relativi ai plots 2×2 m, senza features di disturbo presenti sul terreno (sassi, rami, ecc.) e privi di eventuali errori grafici prodotti durante le fasi di ricostruzione tridimensionale.

Nella parte sinistra dell'immagine è rappresentata la situazione presente nell'Area 1C, cioè lavorata con tecniche di tipo conservativo, mentre a destra è presente il plot relativo all'Area 1NC che fa riferimento alla situazione nel campo trattato con tecniche convenzionali.

La colorazione scelta per questa rappresentazione permette di evidenziare al meglio le aree con gradi di pendenza elevati identificate dal colore rosso; al contrario, le aree colorate di verde indicano una zona principalmente pianeggiante in cui il grado di pendenza è pressoché uguale a 0.

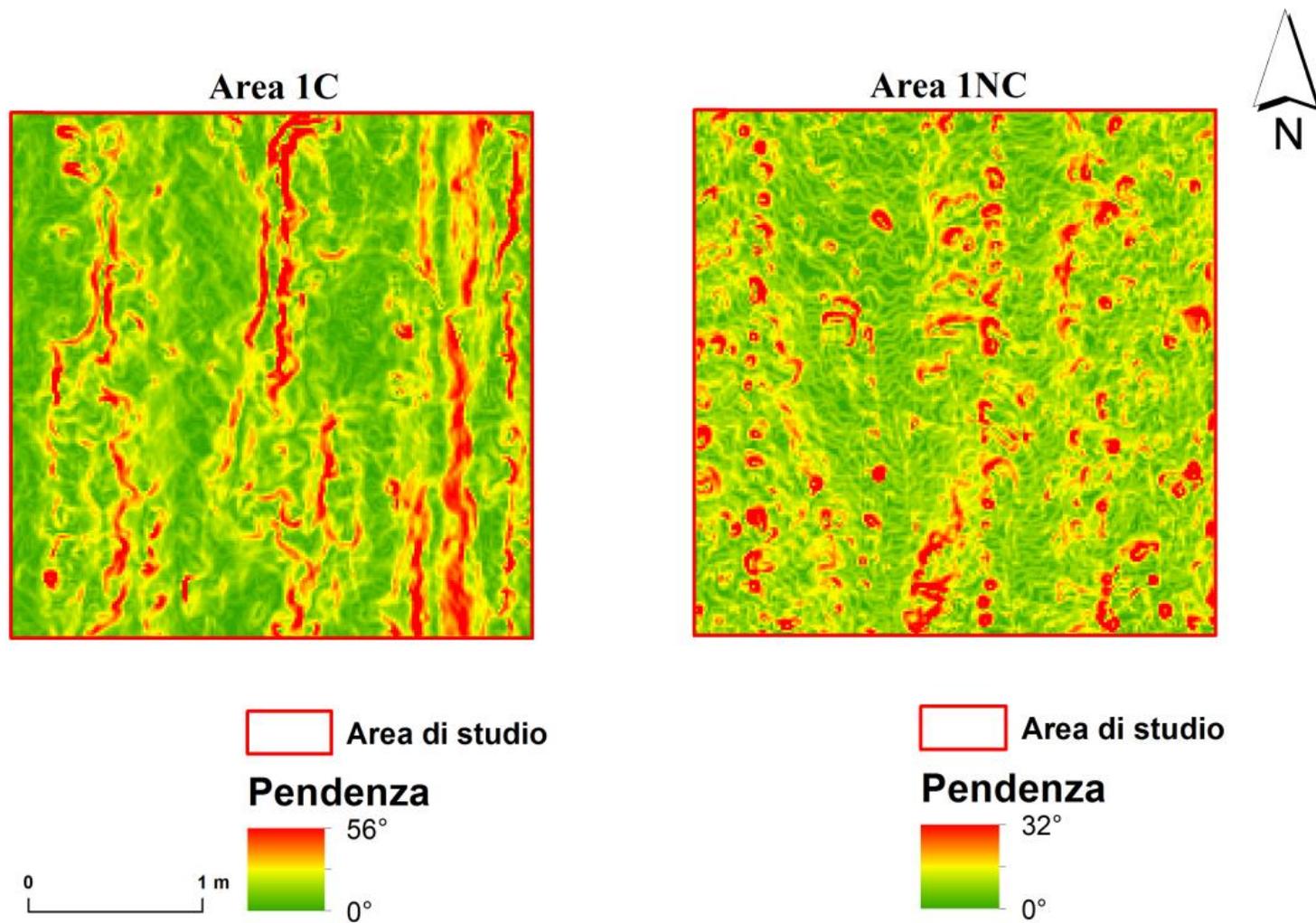


Figura 4.1 La pendenza misurata nell'Area 1C e nell'Area 1NC

Sulla base di un'analisi prettamente visiva, confrontando le due aree si nota che la densità delle zone a elevata pendenza nell'Area 1C è quasi identica a quella presente nell'Area 1NC, se non addirittura inferiore. Perciò potrebbe sembrare che l'area interessata da tecniche conservative abbia una superficie più pianeggiante rispetto a quella interessata da tecniche convenzionali, contrariamente a quanto ci si aspettava nel capitolo introduttivo di questa tesi.

Tuttavia, osservando i valori raffigurati nella legenda si osserva una gradazione massima della pendenza nell'Area 1C di 56° , molto più elevata rispetto all'Area 1NC che invece presenta una pendenza massima di 32° .

Questo potrebbe portare erroneamente ad affermare che, laddove l'Area 1C è colorata di rosso, ci si trova in presenza di depressioni superficiali ampiamente accentuate e profonde del valore di 56° , mentre nelle zone verdi la superficie è piana.

Tale affermazione non è sempre vera, poiché il punto di massimo riportato nella legenda potrebbe corrispondere anche a un solo e unico pixel presente all'interno dell'Area 1C, nel quale il grado di pendenza assume il valore di 56° . Per questo motivo, sono stati costruiti dei grafici con MATLAB (Figura 4.3) al fine di identificare al meglio la distribuzione dei valori all'interno delle sei aree di studio.

Anche nelle altre quattro aree analizzate, la situazione appena descritta è molto simile, infatti, il valore massimo della pendenza nell'Area 2C è di 55° e nell'Area 3C è di 60° , corrispondenti a quasi il doppio dei valori presenti nelle aree 2NC e 3NC che presentano rispettivamente 46° e 35° (Figura 4.2).

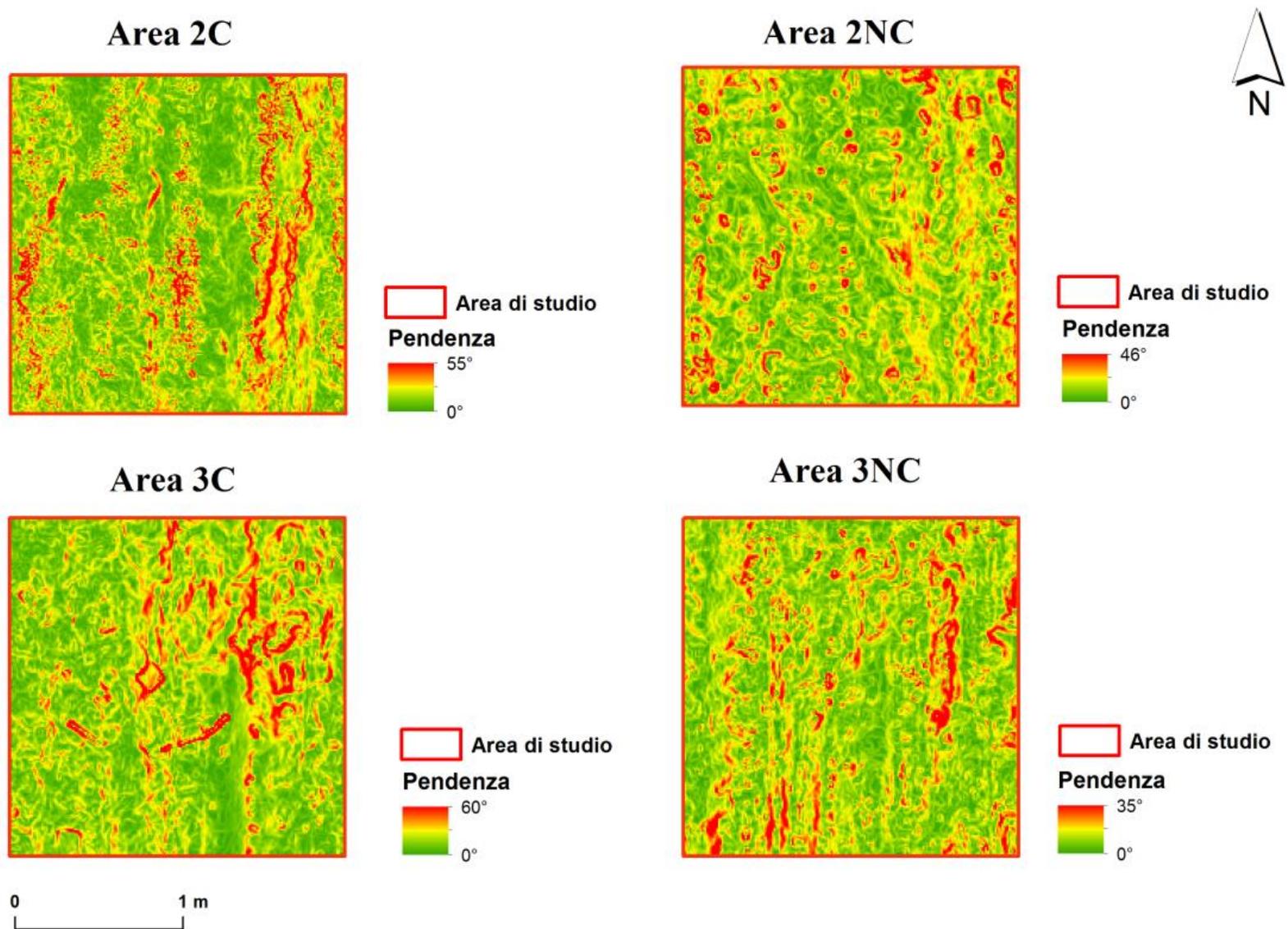


Figura 4.2 La pendenza nelle aree 2C, 3C, 2NC e 3NC

Tuttavia, bisogna ricordare che il valore massimo rappresentato nelle legende può corrispondere anche solamente al grado di pendenza maggiore di un unico pixel delle aree di studio.

Perciò, è più interessante soffermarsi sull'analisi della distribuzione dei punti presenti all'interno di ciascuna area con i grafici relativi alla funzione di densità di probabilità (PDF, ovvero Probability Density Function), elaborata con MATLAB, con i quali si può capire quale sia effettivamente la classe di pendenza maggiormente presente nell'area di studio (Figura 4.3).

Nell'asse verticale delle ordinate è riportata la funzione di densità di probabilità, che è l'analogo della funzione di probabilità nel caso in cui la variabile casuale X sia continua, cioè con valori che assumono la potenzialità della continuità tra loro. In questa circostanza, non è corretto determinare la probabilità in base a ciascun valore che può essere assunto dalla variabile casuale semplice X , perciò si utilizza la formula (4.1) che permette di determinare la probabilità che il valore assunto dalla variabile aleatoria X ricada all'interno di un dato intervallo, anche piccolissimo, compreso tra a e b , cioè i valori che delimitano la classe nell'asse delle ascisse che si trova intorno alla variabile X .

Nella formula sottostante è descritto il calcolo della funzione di densità di probabilità $f(x)$ presente in ogni punto dello spazio campionario preso in esame.

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x)dx \tag{4.1}$$

dove P è la probabilità che la variabile continua X ricada in un preciso intervallo, X è la variabile casuale continua, a e b sono i valori che delimitano l'intervallo che caratterizza la classe nell'asse delle ascisse, $f(x)$ è la funzione di densità di probabilità.

È importante ricordare che la funzione di densità di probabilità, non è una vera e propria probabilità, ma è comunque legata alla probabilità attraverso il calcolo dell'integrale della funzione di densità. Inoltre, una funzione di densità di probabilità non può mai assumere valori negativi o superiori a 1 poiché il minimo valore possibile è 0, corrispondente alla probabilità che X non ricada in quel intervallo, e l'area totale massima che può essere sottesa dal grafico della PDF è uguale a 1, quando, ad esempio, i valori di a e b corrispondono rispettivamente a $-\infty$ e $+\infty$, quindi si ottiene la probabilità dell'evento certo.

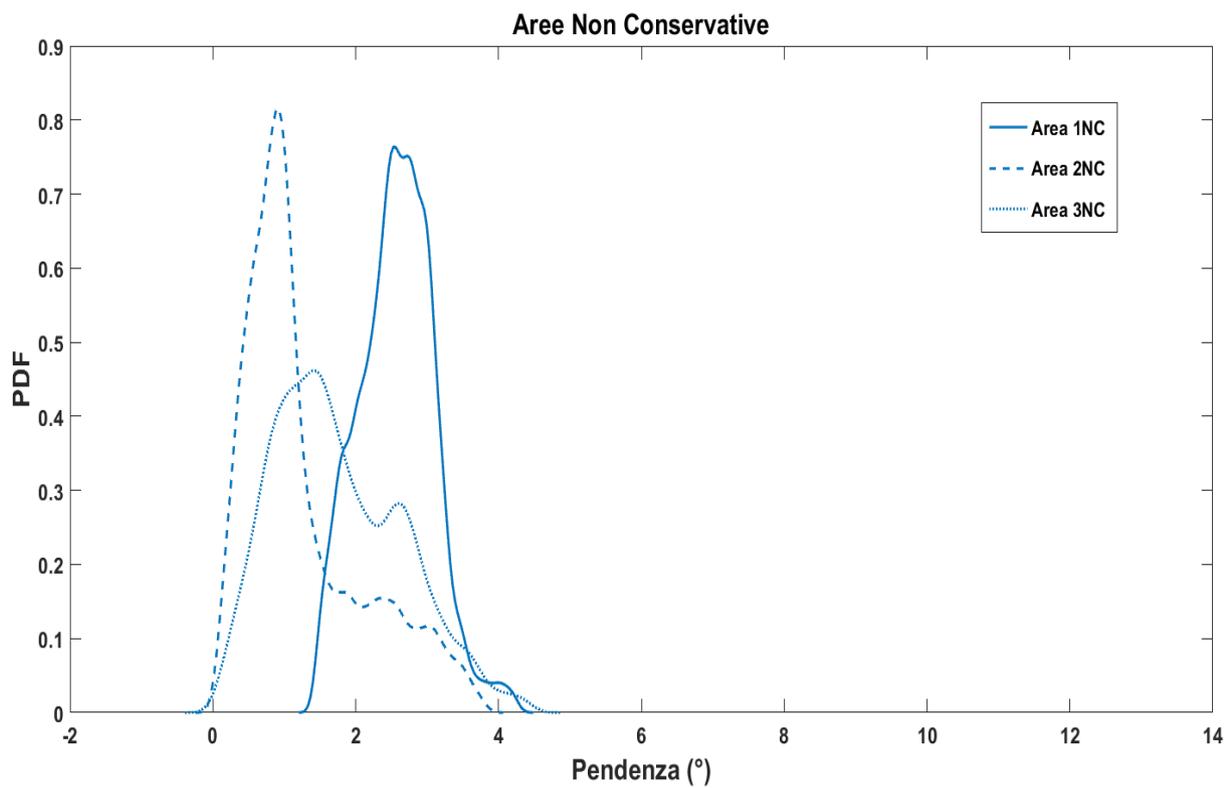
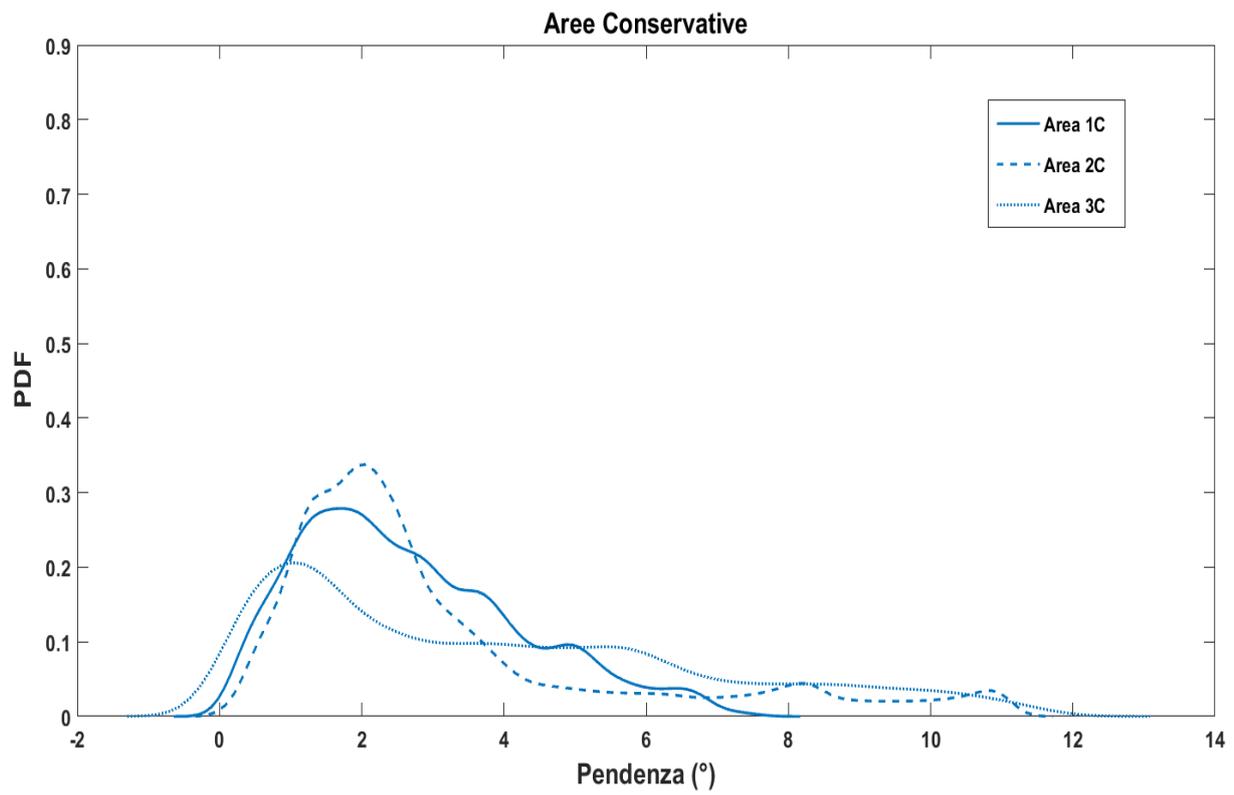


Figura 4.3 I grafici relativi alla pendenza nelle sei aree di studio

Come si nota, nel grafico relativo alle aree interessate da agricoltura conservativa, i gradi di pendenza più alti, compresi tra 0° e 14°, sono molto inferiori rispetto al punto massimo riportato nelle legende di ciascuna area, comunque il loro valore è sostanzialmente più elevato rispetto alle aree interessate da agricoltura non conservativa, le quali presentano un'alta PDF solo con gradi di pendenza bassi che si aggirano tra gli 0° e i 5°.

Nelle depressioni causate dalle variazioni di pendenza presenti sulla superficie di ogni area, può convogliare l'acqua piovana e quella proveniente dall'irrigazione che, attratte dalla forza di gravità, vanno a riempirle piano piano fino a fuoriuscire.

Secondo quanto riportato nei grafici precedenti si suppone, perciò, che nelle aree lavorate con tecniche convenzionali, l'acqua convogliata nelle depressioni traboccherà più velocemente rispetto alle aree lavorate con tecniche conservative, in quanto ci metterà meno tempo a riempire il piccolo bacino formatosi. Invece, nelle aree di studio interessate da metodi conservativi, le depressioni formano dei bacini più profondi, a causa dei valori di pendenza più elevati, in cui defluiscono maggiori volumi d'acqua e per i quali i tempi necessari al loro totale riempimento si allungano.

La pendenza è stata calcolata anche per diverse misure di una finestra mobile, con il programma LandSerf, al fine di analizzare più nel dettaglio le differenze del terreno e l'influenza delle dimensioni delle features presenti nell'area di studio.

Come descritto nel sottocapitolo riguardante il calcolo della curvatura, la grandezza ottimale della finestra mobile per la rappresentazione più realistica dei valori della pendenza nella superficie delle sei aree è quella 45×45 cm (Figura 4.4), definita la migliore in base a quanto affermato da Pirotti e Tarolli (2010), i quali dichiarano che le dimensioni ideali per la finestra mobile devono essere almeno il triplo della grandezza delle features da studiare; in questo caso la dimensione degli oggetti presenti nell'area da analizzare è di circa 10-15 cm.

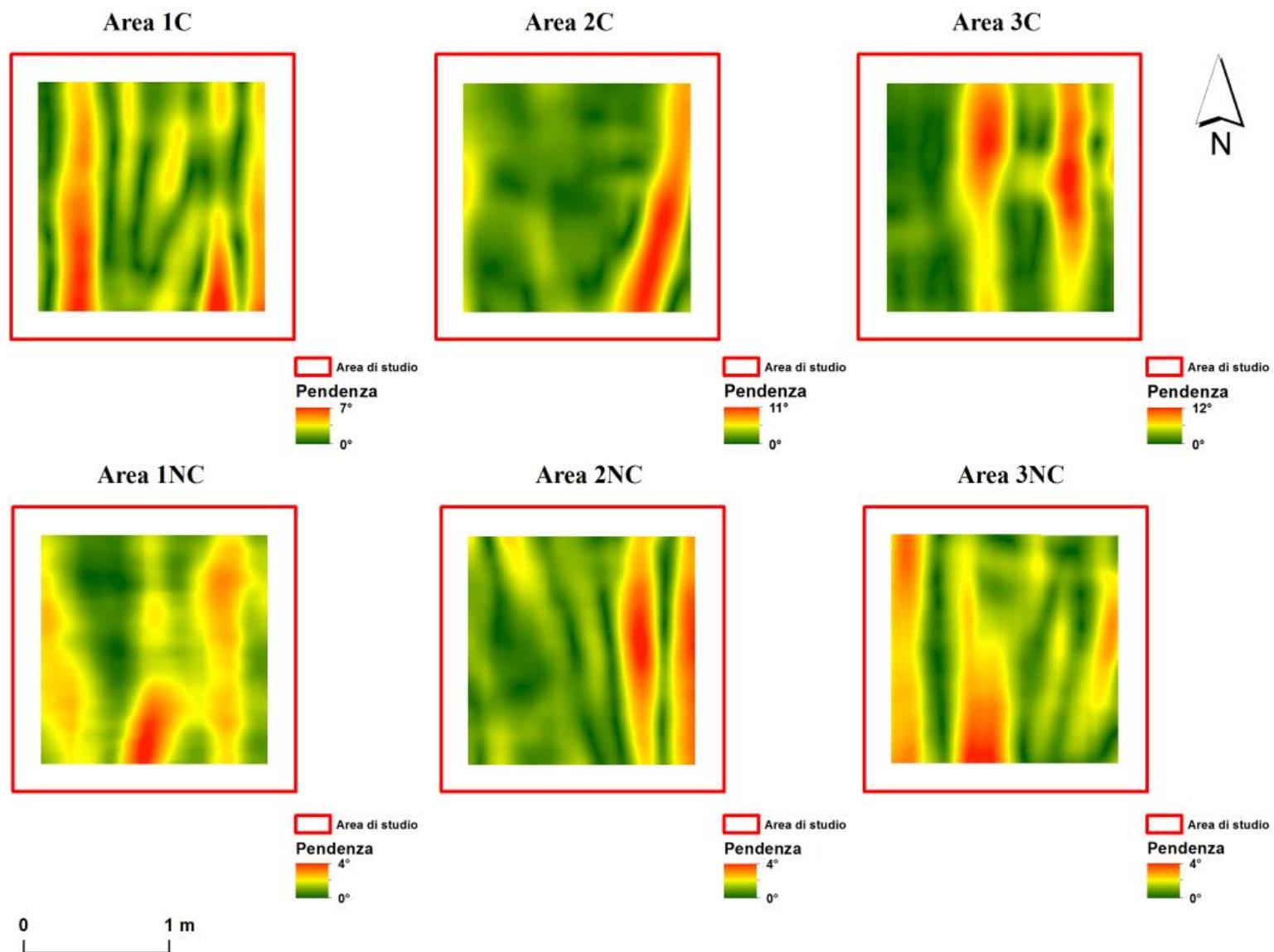


Figura 4.4 Rappresentazione della pendenza delle sei aree realizzata con una finestra mobile di dimensioni 45×45 cm

Le misure delle finestre mobili utilizzate per il calcolo di questo parametro sono state anche 5×5, 9×9, 15×15 e 31×31 cm e, osservando le colorazioni delle pendenze nelle sei aree ottenute con le diverse dimensioni della finestra mobile, ci si è accorti che l'accrescimento delle dimensioni della finestra mobile utilizzata comporta un progressivo aumento del cosiddetto "effetto smoothing", cioè di smussamento delle reali condizioni di scabrosità presenti nella superficie dell'area studiata.

Inoltre, prestando attenzione ai valori riportati nelle legende della Figura 4.4, si nota che i gradi di pendenza massima presenti nelle aree interessate da tecniche di agricoltura conservativa equivalgono al doppio o, addirittura, al triplo di quelli inseriti nelle legende delle aree trattate con tecniche convenzionali.

Precisamente, le aree inserite nel campo arato con tecniche convenzionali hanno tutte lo stesso valore massimo di pendenza equivalente a 4°, invece, nel caso delle aree del campo coltivato in maniera conservativa, i gradi di massima pendenza sono 7° (Area 1C), 11° (Area 2C) e 12° (Area 3C).

Da queste affermazioni, si comprende come la parte superficiale del campo agrario coltivato con tecniche conservative riesca a mitigare più a lungo gli effetti dannosi provocati dalle precipitazioni molto intense, evitando la formazione di fenomeni di runoff con la conseguente diminuzione dell'erosione idrica della risorsa suolo e l'aumento del contenuto di acqua nel sottosuolo. Anche nel caso di fenomeni temporaleschi di breve entità si osserva una migliore predisposizione al deflusso dell'acqua nelle depressioni e una veloce infiltrazione dovuta ai macro-pori presenti nelle aree trattate con metodi conservativi rispetto ai campi coltivati convenzionalmente, dove il fluido in questione riempie più in fretta le piccole depressioni superficiali, non si infila rapidamente in profondità e fuoriesce causando ruscellamento.

Tuttavia, queste considerazioni non sono confermate totalmente e inequivocabilmente dai valori del parametro analizzati nelle figure precedenti poiché i fenomeni di ruscellamento superficiale possono avere origine anche per altre cause differenti dalla pendenza. Quindi, le affermazioni fatte in precedenza risultano sensate, ma hanno comunque bisogno di essere confermate con analisi ancora più specifiche e dettagliate, tenendo conto delle numerose cause che potrebbero formare il runoff e la conseguente erosione del suolo.

4.2 La mappa delle ombre

La mappa delle ombre permette di comprendere al meglio la morfologia superficiale presente in una zona attraverso la creazione di punti più o meno luminosi in base alla posizione della fonte di luce.

Le ricostruzioni grafiche relative alla mappa delle ombre sono rappresentate in Figura 4.5, da questa è possibile determinare l'ipotetica illuminazione di una superficie in base all'altezza di una sorgente luminosa rispetto all'orizzonte. Il modello che si ottiene permette di identificare la posizione esatta delle ombre, al fine di comprendere più nello specifico l'altezza e l'influenza delle linee di semina e di interfila. Inoltre, permette di rilevare eventuali errori presenti nella ricostruzione tridimensionale della parte di terreno da cui deriva.

Le zone in ombra e quelle illuminate dalla luce sono rappresentate sotto forma di sfumature di grigio che, secondo la loro intensità di colorazione, coincidono con i numeri interi compresi nell'intervallo di valori che parte da 0 e arriva a 255 del sistema RGB (Red/Green/Blue).

In base a quanto affermato, è chiaro che all'aumentare dei valori corrisponde un andamento dal colore nero delle zone ombreggiate verso il bianco delle zone fortemente illuminate dalla luce solare.

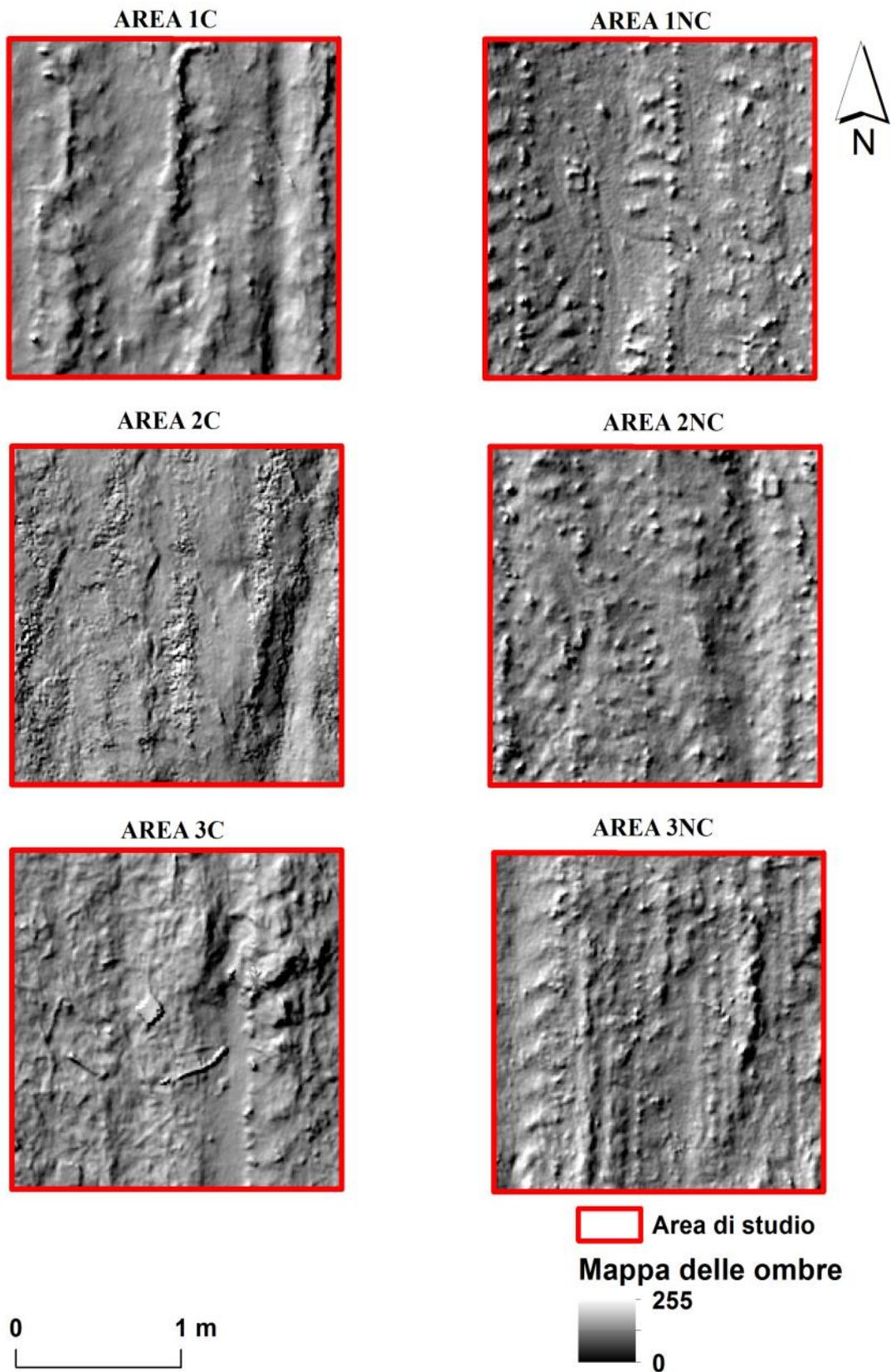


Figura 4.5 Rappresentazione grafica della mappa delle ombre per le sei aree di studio

Nella Figura 4.6 sono stati riportati i DTMs delle sei aree oggetto di studio sovrapposti alla mappa delle ombre di riferimento, grazie all'uso delle opzioni di trasparenza presenti in ArcMap. In questo modo è stato possibile rappresentare visivamente la morfologia superficiale rendendola facilmente comprensibile già solo alla prima osservazione.

Dalla legenda si può notare che le sei aree si trovano approssimativamente tutte a un'altitudine di 12 m sul livello del mare, con un intervallo di valori compreso in circa 50 cm.

La colorazione scelta per la rappresentazione grafica dei DTMs sovrapposti alla mappa delle ombre permette di identificare le parti con altitudine più bassa con le diverse gradazioni di verde e giallo, le parti marroni sono quelle a media elevazione, le parti in bianco corrispondono alle zone più alte presenti nell'area di studio.

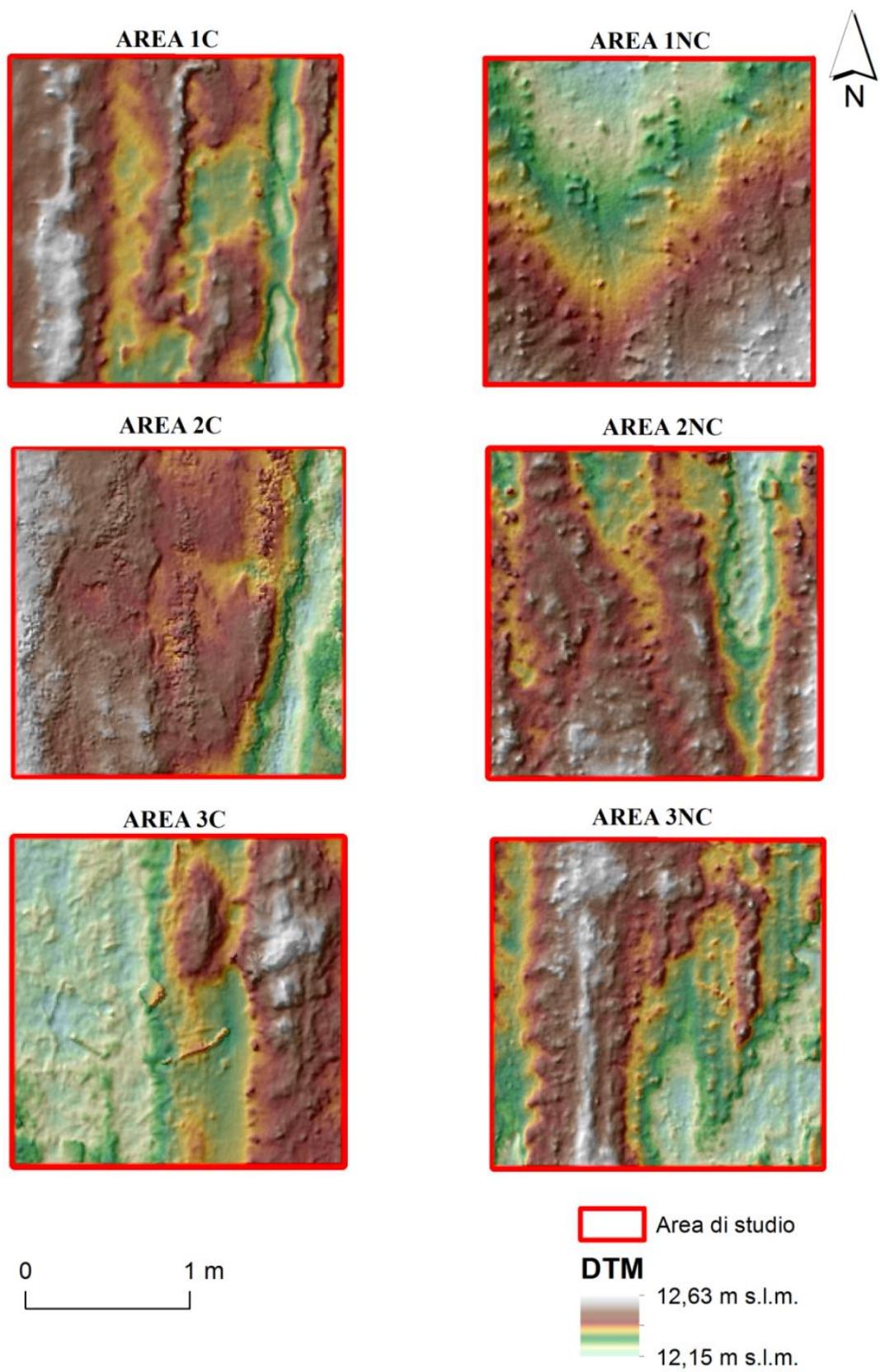


Figura 4.6 Rappresentazione dei DTMs sovrapposti alla mappa delle ombre delle sei aree

Anche in questo caso l'analisi del parametro morfologico della mappa delle ombre si sofferma sui plots identificativi dell'area di riferimento.

Nell'Area 1C si può ben identificare, sulla parte sinistra dell'immagine, una zona colorata di bianco corrispondente a una fila di coltura in cui si trovano le plantule di soia e posizionata a un'altitudine superiore rispetto al resto dell'area in esame. Nella parte destra, invece, si nota una depressione lineare di circa 30 cm d'ampiezza, parallela al contorno destro del plot, che corrisponde alla linea di passaggio di una ruota della macchina trattrice che ha provocato l'abbassamento dello strato superficiale del terreno nella zona interessata. Le ombre sono molto presenti lungo tutta la superficie dell'area analizzata in corrispondenza delle zone più alte.

L'Area 2C mostra dei valori di altitudine elevati nel contorno sinistro del plot, i quali diminuiscono avvicinandosi sempre più verso il lato destro. Nella parte destra, infatti, si nota una zona verde che corrisponderebbe a un canale di runoff scavato durante gli eventi piovosi. In questo caso le ombre sono più sparse lungo tutta l'immagine e non presentano importanti addensamenti.

L'Area 3C si presenta visivamente tagliata in due metà, per cui la parte sinistra ha colorazione verde e con poche ombre, mentre la parte destra è principalmente marrone e con più ombre. Si nota che la parte destra possiede un'altitudine superiore rispetto alla parte sinistra che risulta essere anche più pianeggiante poiché priva di ombre, in accordo con quanto dimostrato nel sottocapitolo relativo alla pendenza. Nella parte centrale della figura si trova un rilievo della superficie piuttosto elevato, che produce un'ombra ampiamente rilevante.

Per quanto riguarda l'Area 1NC, il DTM presenta dei valori che diminuiscono avvicinandosi verso il lato superiore del plot, le ombre non sono molto accentuate e sono diffuse in tutta l'area. Da ciò, si può affermare che la zona in oggetto è particolarmente pianeggiante e fortemente lisciviata dai fenomeni di runoff che si sono sviluppati anticipatamente rispetto ai giorni in cui sono stati effettuati i rilievi fotogrammetrici. Nella parte in basso a sinistra c'è un aumento del colore bianco, dovuto all'altitudine presente in quella zona.

Nell'Area 2NC si nota una depressione nella parte superiore a destra del plot, questa potrebbe essere causata da scavi effettuati dall'acqua durante il ruscellamento superficiale nelle operazioni di irrigazione o nel corso di abbondanti piogge. Questa affermazione è valorizzata dal fatto che, ai bordi del canale, sono presenti aree bianche a elevata altitudine, le quali indirizzano il flusso verso la depressione. In quest'area, perciò, si suppone di aver rappresentato il punto di origine di un canale di runoff. Nell'area stessa sono presenti numerose ombre, in particolar modo esse si notano vicino a features ben identificabili e coincidenti ai piccoli rilievi della superficie.

Infine, nell'area 3NC si osserva la presenza di una fila di coltura particolarmente elevata rispetto alla restante superficie e, nella parte inferiore destra dell'immagine, la colorazione è verde chiaro, corrispondente a valori bassi dell'altitudine. In questo caso le ombre si notano solo in prossimità delle parti marroni, cioè in coincidenza con i rilievi della superficie.

4.3 La curvatura

L'analisi della curvatura presente nelle sei aree analizzate è stata effettuata con l'utilizzo del software LandSerf, il quale ha permesso di costruire le rappresentazioni grafiche relative alla curvatura massima, minima e media per ogni area a differenti grandezze della finestra mobile o window size. Per ogni area, infatti, sono state rappresentate le tre curvature con window size diversa. Si è partiti da finestre mobili di dimensioni 5×5 cm, per poi passare a 9×9, 15×15, 31×31 e infine 45×45.

La grandezza della finestra mobile è un parametro che influenza fortemente il calcolo degli indici morfometrici, in particolare della curvatura, e deve essere perciò scelto in base alla grandezza delle features presenti nell'area che si vuole analizzare. Come si nota nella Figura 4.7, dove è stata rappresentata la curvatura media dell'Area 1C, le finestre mobili di grandezza inferiore ai 15×15 cm non permettono di ottenere una rappresentazione grafica molto attendibile e facilmente comprensibile delle caratteristiche geomorfologiche nell'area stessa. Infatti, nel caso di finestre mobili 5×5 e 9×9, si denota che l'influenza della misura aumenta in quanto le features sono molto più grandi della dimensione utilizzata per la costruzione della finestra mobile, perciò si rischia di avere una forte incertezza nei calcoli finali. Al contrario, con ampiezze della finestra mobile superiori a 45×45, si provoca una smussatura troppo elevata della superficie, la quale risulta non essere corrispondente alle reali condizioni morfologiche presenti in quell'area.

Per quanto riguarda la curvatura analizzata con grandezza della finestra mobile 31×31 e 45×45 cm, l'area rappresentata mostra molto bene quella che è la struttura superficiale grazie alle fasce colorate e facilmente identificabili. In questa tesi, si è deciso di procedere con l'analisi della curvatura per ogni area utilizzando una finestra mobile di 45×45 cm, al fine di ottenere una rappresentazione conforme alle misure delle features che, essendo di una grandezza pari a circa 15 cm, richiedono una finestra mobile grande almeno il doppio o il triplo (Pirotti e Tarolli, 2010).

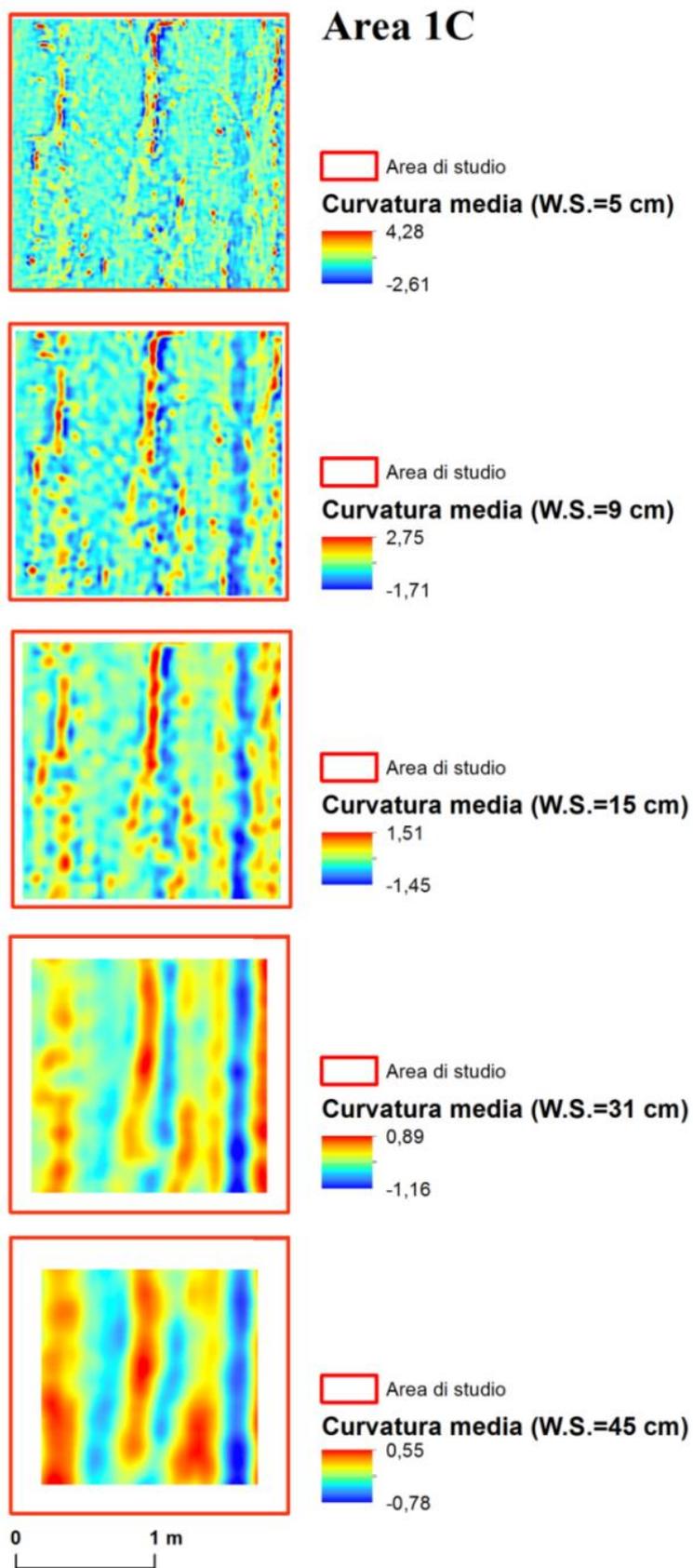


Figura 4.7 Rappresentazione della curvatura media nell'Area 1C a diverse grandezze della finestra mobile (W.S. = Window Size)

Come si può osservare, la parte bianca che si trova all'interno del bordo rosso, il quale identifica l'area di studio, si ingrandisce in base alla grandezza della finestra mobile, a causa del fatto che all'aumentare delle dimensioni della window size corrisponde una diminuzione del dettaglio delle immagini.

Una buona rappresentazione grafica dell'area attraverso l'utilizzo della finestra mobile deve anche tener conto della risoluzione dei DTMs di riferimento, della loro qualità e del loro grado di pulizia da eventuali oggetti che arrecano disturbo.

Il risultato della curvatura minima in ognuna delle sei aree è riportato in Figura 4.8.

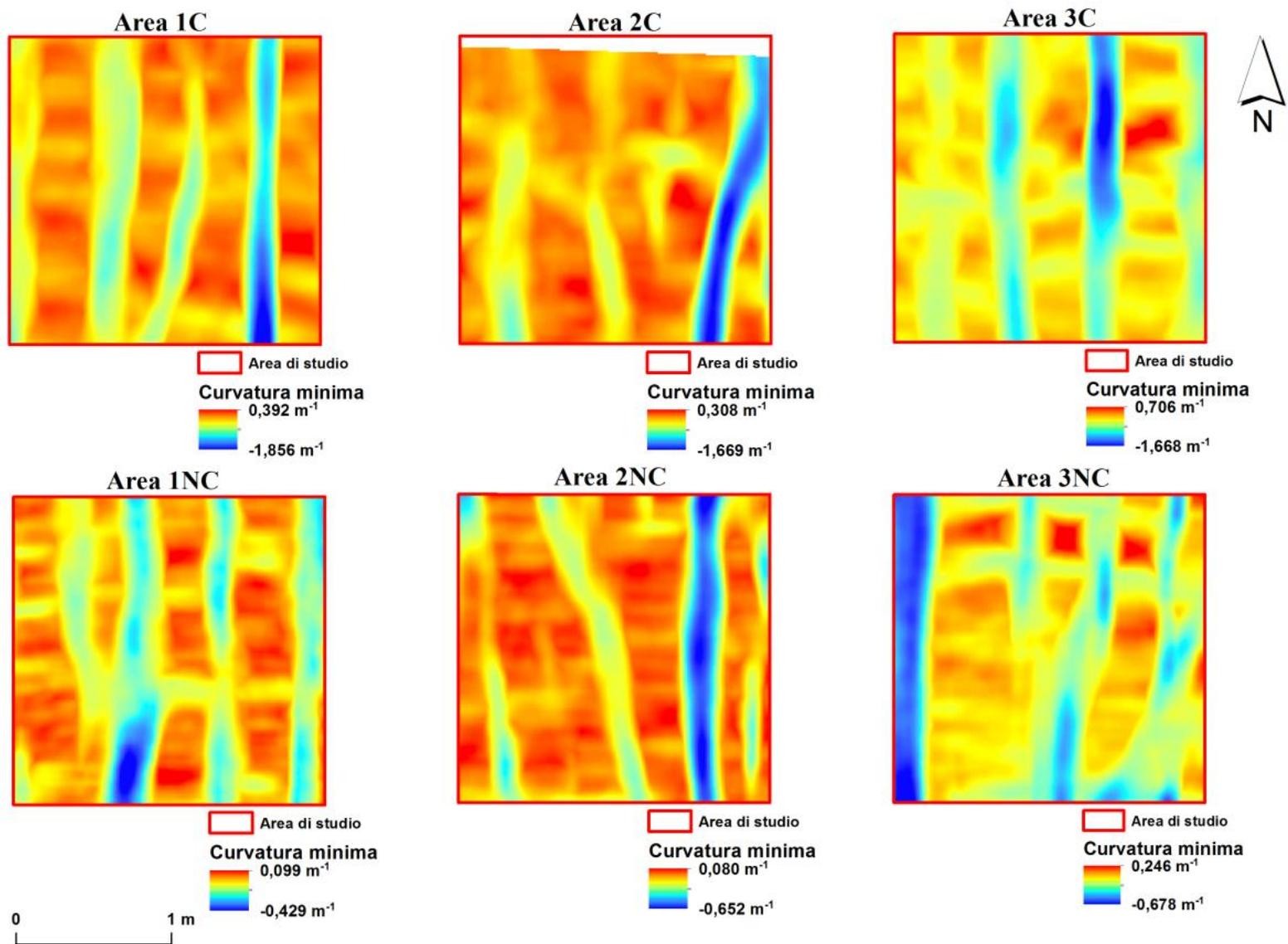


Figura 4.8 Rappresentazioni della curvatura minima nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)

La curvatura minima rappresenta la concavità della superficie verso l'alto, perciò i risultati che si vedono nella Figura 4.8 sono da interpretare nel seguente modo: dove le zone assumono una colorazione rossa ci si trova in una situazione in cui la superficie presenta un'elevata concavità verso l'alto, invece nel caso di colorazione blu la superficie possiede un grado di concavità inferiore pertanto si suppone che in quella posizione si trovi una superficie caratterizzata da convessità verso l'alto.

Da una prima osservazione, si può rilevare che le curvature minime delle sei aree seguono ciò che ci si attendeva da una prima analisi della morfologia superficiale rilevata tramite i DTMs e la mappa delle ombre (Figura 4.6).

Infatti, per quanto riguarda l'Area 1C, il plot è caratterizzato da un'elevata concavità verso l'alto, anche se non mancano valori inferiori allo zero, soprattutto laddove è passata la ruota del trattore durante la fase di semina. Nella parte sinistra dell'immagine, l'alternanza del colore azzurro con il rosso spiega la presenza di una fila di plantule di soia, già descritta nel sottocapitolo precedente.

La prima visualizzazione dell'area di studio Area 2C permette di osservare che la rispettiva curvatura minima non riempie interamente il quadrato, ciò è dovuto al fatto che, avendo scelto una finestra mobile di 45×45 cm ed estraendo il plot 2×2 m, posizionato molto vicino al bordo superiore dell'immagine dell'intera superficie elaborata in CloudCompare, si ottiene una parte priva di misurazioni, ma comunque rappresentativa dell'area in questione.

L'Area 2C possiede valori elevati della curvatura minima in tutta la superficie, tranne in prossimità del canale di runoff parallelo al bordo destro del plot. Ciò significa che quasi tutta la superficie dell'area rivolge la concavità verso l'alto.

Nell'Area 3C si visualizzano valori della curvatura minima inferiori alle aree precedentemente discusse, infatti la colorazione principale in questo caso tende al giallo. Inoltre, la presenza delle file di semina crea un'alternanza tra i colori giallo e azzurro che riproduce fedelmente la morfologia superficiale presente in quest'area.

Nel caso dell'Area 1NC, si ripresenta lo stesso fenomeno di alternanza di colori tipico dell'Area 3C.

Nell'Area 2NC è evidenziata la presenza del canale di ruscellamento scavato dai fenomeni di runoff precedenti all'effettuazione dei rilievi fotogrammetrici e che si trova di fianco al contorno destro del plot. Per quanto riguarda il resto dell'area, si osserva che la stessa è caratterizzata da elevati valori di concavità verso l'alto rappresentati dalla colorazione rossa prevalente.

L'Area 3NC presenta valori della curvatura minima inferiori allo zero lungo il lato sinistro dell'immagine. Come si nota dall'analisi delle mappe delle ombre, questo è dovuto alla presenza

di una fila di coltura posizionata a un'altitudine molto elevata rispetto al resto della superficie. La restante parte di area viene rappresentata da valori della curvatura minima non particolarmente elevati, perciò il colore prevalente è il giallo.

Dedicando particolare attenzione ai valori presenti nella legenda di ciascuna delle aree, si può constatare che, nelle aree interessate da agricoltura di tipo conservativo, l'intervallo di valori è molto più ampio rispetto a quello relativo alle aree lavorate con tecniche convenzionali.

In accordo con quanto esposto nel sottocapitolo relativo alla pendenza, si deduce che la superficie presente nel campo agricolo di tipo conservativo abbia variazioni di altitudine più ripide e accentuate rispetto alle aree dell'appezzamento coltivato con metodi convenzionali.

Per ciascuna delle sei aree è stata anche analizzata la curvatura massima della superficie, la quale indica il grado di convessità verso l'alto ed è riportata nella Figura 4.9.

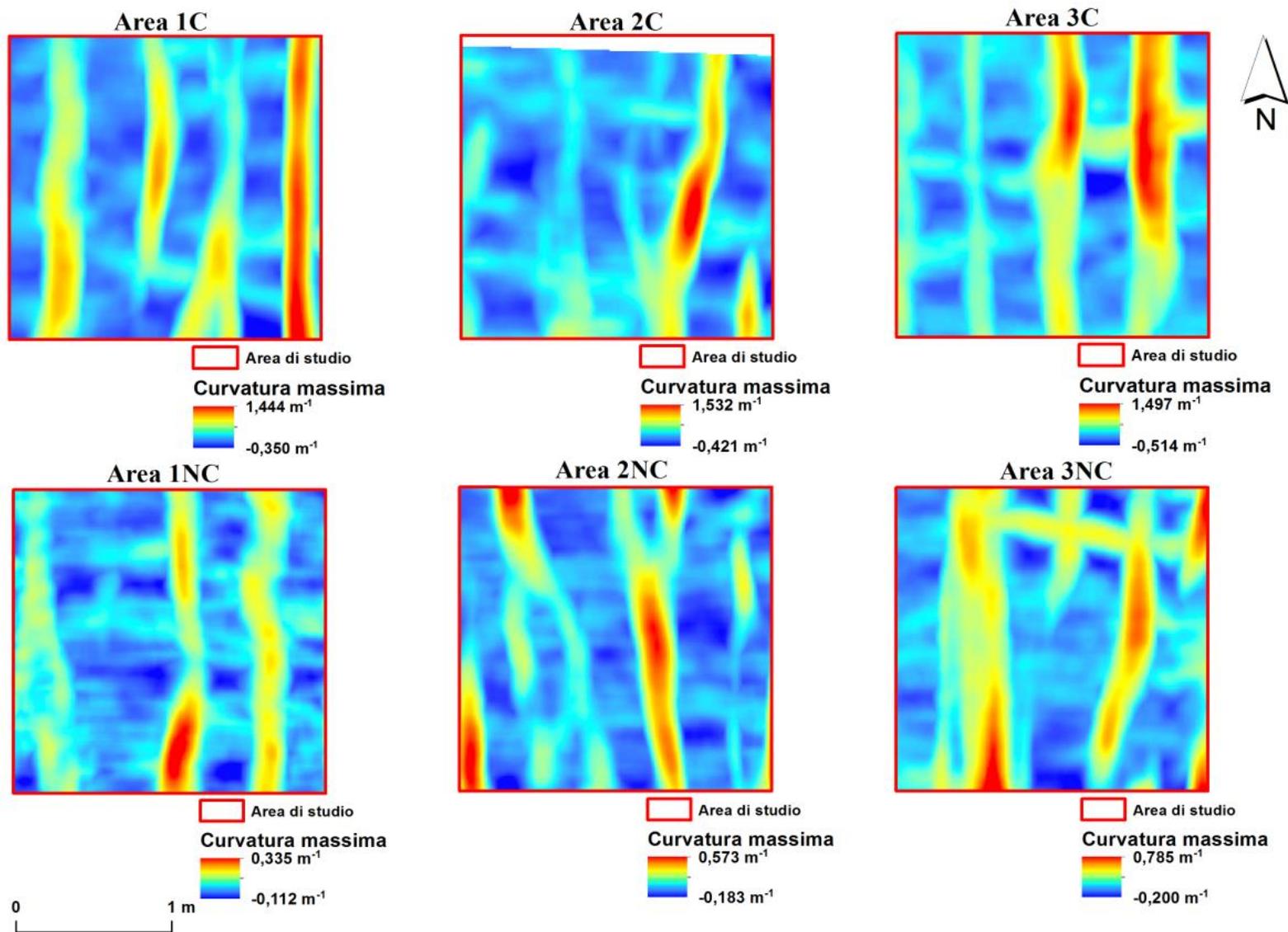


Figura 4.9 Rappresentazioni della curvatura massima nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)

Da una prima sommaria osservazione, ci si accorge subito che il colore più presente è il blu, al contrario delle aree esaminate per la curvatura minima in cui il colore prevalente era il rosso. Tutto ciò è in accordo con la definizione delle due curvature esposta nel capitolo 3 in cui si afferma che la curvatura minima rappresenta la concavità verso l'alto della superficie, mentre la curvatura massima indica la convessità della superficie stessa.

In merito alla curvatura massima dell'Area 1C si può affermare che, parallelamente al lato destro del plot, è presente una fascia rossa corrispondente alla fila di semina ben evidenziata nell'analisi dei DTMs e della mappa delle ombre. Nella restante parte del quadrato il colore che prevale sugli altri è il blu, anche se non mancano colorazioni gialle e arancioni coincidenti con le file di semina in quest'area.

L'Area 2C è caratterizzata da colorazioni blu in tutta la superficie, tuttavia, ai lati del canale di ruscellamento, la colorazione tende al rosso a causa della diminuzione della convessità della superficie in favore dell'aumento di concavità verso l'alto.

Nell'Area 3C si trova una successione di valori minimi e massimi che segue l'alternarsi di file di semina e interfile dal bordo inferiore del plot verso Nord.

L'Area 1NC è coperta generalmente da superfici convesse, però sono presenti alcune zone tendenti al giallo e rosso in prossimità delle linee di coltura in cui si trovano le piantine di soia. In questo caso si osservano numerosi punti con una colorazione azzurra prevalenti in tutta l'area e confinanti tra loro, segnale di una zona che è maggiormente pianeggiante.

Nell'Area 2NC la convessità caratterizza tutta la superficie, anche se non mancano zone in cui i valori tendono a essere caratterizzati da concavità verso l'alto, soprattutto in corrispondenza delle zone con altitudine più elevata rispetto al resto dell'area.

Infine, l'Area 3NC, presenta una certa complessità nella descrizione dei valori ottenuti. In questa circostanza, l'area assume una colorazione azzurra nella parte centrale e in basso a destra del plot, tuttavia si notano anche numerose fasce rosse, una delle quali addirittura trasversalmente alla direzione delle file di semina. Ciò è dovuto al fatto che, probabilmente, ci siano state delle piante infestanti che hanno influenzato la morfologia superficiale con i loro apparati radicali creando degli innalzamenti della stessa.

Anche in questo caso bisogna porre molta attenzione all'analisi dei valori riportati nella legenda poiché si notano generalmente intervalli molto più ampi nelle zone lavorate con metodologie conservative, in accordo con quanto detto per la curvatura minima.

Dopo aver analizzato la curvatura minima e quella massima, si possono costruire anche le mappe relative alla curvatura media presente nelle sei aree.

La rappresentazione di questo parametro è riportata in Figura 4.10.

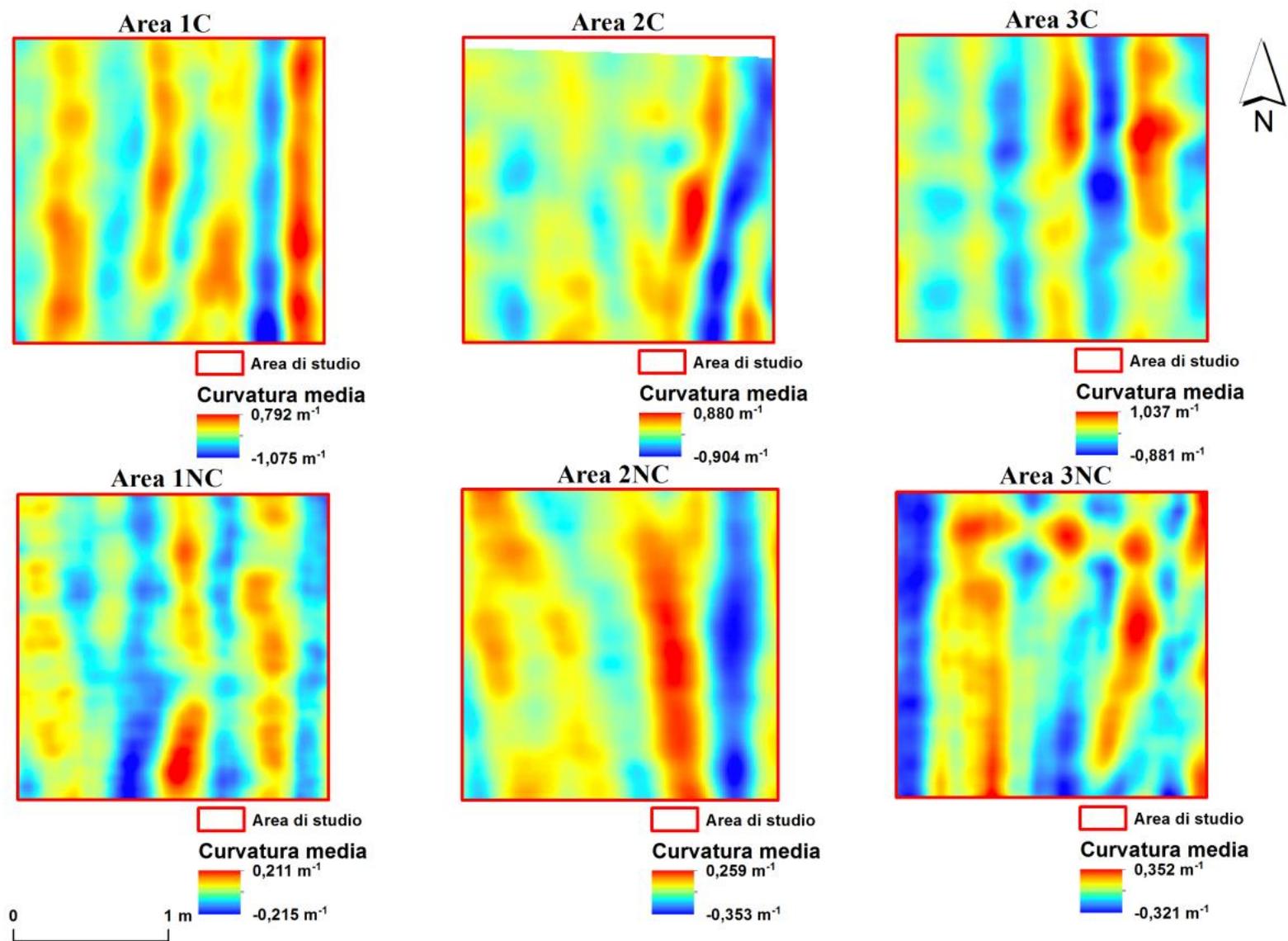


Figura 4.10 Rappresentazioni della curvatura media nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)

La curvatura media delle sei aree è stata anch'essa ottenuta con l'utilizzo del software LandSerf. Inoltre, confrontando tra loro i valori della curvatura minima e massima presenti in ogni punto della superficie, è possibile comprendere che la curvatura media possiede effettivamente dei valori intermedi tra le due curvature suddette, proprio come nel caso del calcolo di una media aritmetica in cui il valore medio assume una posizione pressoché centrale tra il dato massimo e quello minimo della distribuzione numerica.

Ciò ha portato all'ottenimento di sei figure rappresentative della situazione media in ognuna delle sei aree.

L'Area 1C è rappresentata con valori perlopiù giallo-rossi, anche se non manca una fascia blu scura in prossimità del passaggio delle ruote della macchina trattrice.

Per quanto riguarda l'Area 2C, la superficie nella parte sinistra del quadrato tenderebbe a essere quasi pianeggiante. Anche in questo caso è presente una fascia blu nella parte destra del plot, corrispondente a un canale di ruscellamento creatosi in precedenza.

Nell'Area 3C si nota l'alternanza dei colori che seguono la presenza delle linee di semina spaziate dalle interfile, perciò le colorazioni rosse e blu si avvicendano orizzontalmente.

L'area 1NC presenta numerose variazioni di colore, questo sembrerebbe indicare una zona in cui la superficie possiede una concavità e una convessità verso l'alto con valori che discostano molto tra loro; tuttavia dall'analisi dei dati riportati nella legenda si può comprendere come l'intervallo di valori abbia un massimo e un minimo non particolarmente lontani tra loro, se confrontati con le altre aree, perciò l'area risulta essere la più pianeggiante e meno interessata da curvature fortemente accentuate.

L'Area 2NC assume una colorazione rossa intensa nella fascia centrale del quadrato, affiancata da una parte blu a destra e una azzurra a sinistra. Da questa disposizione si può comprendere l'effettiva posizione della fila di semina e delle interfile confinanti con essa. Nella parte blu si trova il canale di runoff precedentemente citato e con probabile origine proprio in questo plot.

In conclusione, l'Area 3NC evidenzia la linea rossa trasversale localizzata parallelamente al bordo superiore dell'area di studio. Inoltre, sono presenti numerose alternanze tra i valori alti e bassi della curvatura media che permettono di visualizzare la disposizione delle file e interfile in questa zona oggetto di studio.

I dati riportati nelle legende delle sei aree sono i valori medi ottenuti tramite la media aritmetica della curvatura minima e quella massima, perciò anche in questa situazione gli intervalli di valori nelle aree del campo coltivato con tecniche conservative sono maggiori rispetto a quelli delle aree nel campo lavorato con metodi convenzionali.

4.4 L'indice di scabrezza superficiale

L'indice di scabrezza superficiale è stato anch'esso calcolato con finestre mobili di varie misure, tuttavia si è scelto di rappresentarlo solamente per la window size 45×45 cm, cioè la dimensione ottimale per la costruzione della relativa raffigurazione grafica di questo indice.

La scabrezza di un terreno influenza la velocità dei flussi di ruscellamento, talvolta addirittura fermandoli. Infatti, nelle superfici che presentano alti valori di scabrezza, risulterà difficile che i sedimenti vengano trasportati velocemente dalla fonte, detta "source" cioè sorgente, fino alla base del fondovalle, definita in inglese "sink". Da ciò, si può affermare che la scabrezza superficiale di un'area influenza il deflusso, non solo per quanto riguarda la direzione, ma anche per la sua intensità.

Nella Figura 4.1 sono rappresentati gli indici di scabrezza superficiale per le sei aree oggetto di studio.

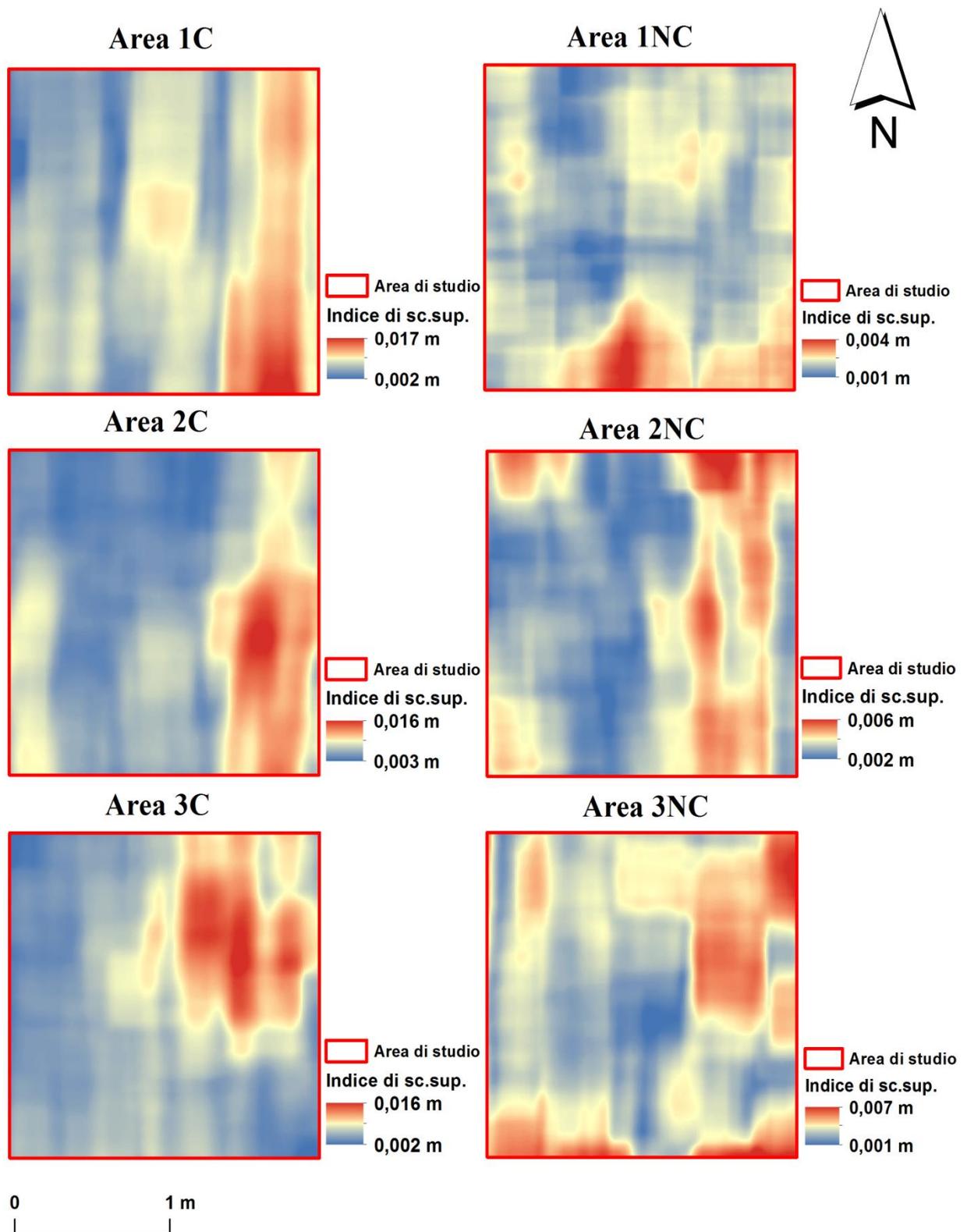


Figura 4.11 Rappresentazione dell'indice di scabrezza superficiale nelle sei aree di studio (Finestra mobile = 45×45 cm)

Da una prima osservazione, nell'Area 1C si osserva che il massimo valore della scabrezza si trova lungo il lato destro dell'area di studio, in prossimità di quella che è la depressione scavata nel terreno dal passaggio dei macchinari durante le operazioni di semina. Inoltre, in tutta la restante area sono evidenziati alcuni valori intermedi della scabrezza superficiale che donano alla zona una colorazione prevalentemente gialla.

L'Area 2C presenta un'elevata scabrezza superficiale nella parte destra del quadrato, in corrispondenza del solco scavato dai fenomeni di ruscellamento. Per quanto riguarda la parte centrale e sinistra di quest'area, il colore maggiormente diffuso è l'azzurro poiché la superficie non è scabrosa.

L'area 3C è liscia nella gran parte della sua estensione, tuttavia, nella zona in alto a destra, è evidenziata una parte molto ruvida. In questa zona rossa, l'indice di scabrezza superficiale assume valori molto elevati perciò ci si attende che il deflusso superficiale venga drasticamente rallentato.

Nell'Area 1NC, l'indice di scabrezza superficiale assume valori molto bassi, infatti, la superficie è molto liscia, forse a causa della lisciviazione creata dal runoff.

L'Area 2NC viene suddivisa in due parti, quella a destra presenta valori elevati di scabrezza superficiale secondo la legenda che la affianca, quella a sinistra, invece, presenta una superficie più liscia ed evidenziata da colorazione azzurra.

Per ciò che riguarda l'Area 3NC, l'indice di scabrezza superficiale non assume una densità di valori uguali in specifiche zone, ma presenta diversi valori che si alternano tra di loro in poco spazio.

Particolare attenzione deve essere dedicata all'analisi dei valori massimi e minimi dell'indice di scabrezza superficiale inseriti nella legenda di ogni singola area. Come si osserva, le aree estratte dal campo coltivato con tecniche non conservative presentano il dato minimo uguale a 0,001 m e quello massimo che si aggira intorno a 0,007 m. Invece, le aree interessate da agricoltura conservativa hanno minimi di circa 0,002 m e massimi uguali a 0,017 m. Ciò mette in evidenza il fatto che le aree lavorate con tecniche di agricoltura conservativa possiedono valori dell'indice di scabrezza superficiale molto più elevati rispetto alle aree interessate da tecniche agricole convenzionali, addirittura possono arrivare a essere più del doppio.

Questo conferma quanto ci si aspettava dopo aver esaminato la letteratura scientifica, in cui si affermava che le tecniche di agricoltura conservativa riducevano fortemente i fenomeni di runoff e l'erosione idrica del suolo, grazie a un aumento della scabrezza della superficie del terreno. Bisogna però ricordare che il valore massimo e quello minimo riportati nella legenda costruita per ogni area di studio, corrispondono all'indice di scabrezza superficiale che si può trovare

anche solo in un solo pixel che si trova all'interno del plot. Ciò consente perciò di affermare che, sebbene i valori di scabrezza superficiale siano comunque elevati in corrispondenza delle zone colorate di rosso, i valori massimi e minimi riportati nella legenda potrebbero coincidere con l'indice di scabrezza superficiale massimo e minimo presente in un solo punto dell'area analizzata e quindi influenzare l'osservazione basata fondamentalmente sulle variazioni di colore. Per questo motivo, è necessario focalizzare l'attenzione sulla distribuzione dei dati relativi a questo parametro, evidenziando le classi di scabrezza superficiale più presenti all'interno dell'intervallo dei valori assunti nel plot.

Nella letteratura analizzata, purtroppo, non è riportato nessun dato temporale relativo al cambiamento della scabrezza superficiale presente sul campo agrario, quindi, questa tesi è il primo testo nel quale si afferma che è possibile calcolare un aumento della scabrezza superficiale nei suoli interessati da agricoltura conservativa dopo appena 20 mesi.

Si tratta di una scoperta molto utile per favorire l'adozione di questa tipologia di agricoltura anche agli agricoltori più scettici, in accordo con l'applicabilità e la potenzialità specifica in ogni zona geografica con le sue relative condizioni climatiche, pedologiche e geomorfologiche locali.

Con lo studio di questo parametro è stata dimostrata l'effettiva riduzione degli episodi di runoff nelle aree del campo coltivato con tecniche conservative rispetto a quello coltivato con tecniche convenzionali, secondo quanto dimostrato con i dati ottenuti dalle analisi morfologiche superficiali.

Nei sottocapitoli seguenti è stata analizzata anche l'influenza dell'indice di scabrezza superficiale nelle direzioni del deflusso e nel calcolo dell'indice di connettività.

4.5 L'indice di connettività

Il calcolo dell'indice di connettività ha richiesto la creazione di una zona "buffer", ovvero una zona sovrapposta al contorno dell'area di studio e di ampiezza di 4 cm verso l'interno del quadrato e altri 4 cm verso la parte esterna al plot di dimensioni uguali a 2×2 m. Questa zona ha permesso di comprendere e rappresentare al meglio i valori di questo indice, che sono influenzati principalmente dalla situazione geomorfologica della superficie che si trova intorno al plot di riferimento.

Nella Figura 4.12, il buffer è stato colorato di grigio per facilitarne l'individuazione rispetto all'area di studio, la sua dimensione è stata scelta in base agli scopi previsti dalla tesi e la relativa posizione è stata decisa in corrispondenza del contorno dell'area di studio poiché si tratta della parte più importante per il calcolo dell'indice di connettività.

Per indicare il valore dell'indice di connettività è stata scelta la suddivisione in quattro classi, secondo quanto descritto da Tarolli e Sofia (2016). Le quattro classi in cui sono stati suddivisi i diversi dati relativi all'indice di connettività sono: Basso, Medio Basso, Medio Alto e Alto.

I valori posti agli estremi di ogni classe identificativa sono stati scelti in base alla situazione generale presente nell'area di studio al fine di ottenere una rappresentazione grafica facilmente comprensibile e particolarmente realistica.

Questo parametro è influenzato dai valori dell'indice di scabrezza superficiale calcolati per ogni singola area. Proprio per questo motivo, una scabrezza elevata della superficie limita lo sviluppo di fenomeni di erosione con il relativo trasporto di sedimenti da una zona "source" a una "sink" perciò il valore della connettività sarà basso, al contrario, in una superficie liscia l'erosione idrica risulterà maggiore e pertanto l'indice di connettività risulterà elevato.

Ci si aspetta dunque che, nelle aree del campo di tipo conservativo, la connettività possieda valori più bassi rispetto alle aree non conservative, tuttavia, come si nota, nel nostro caso non si configura questa situazione.

L'indice di connettività è stato calcolato impostando una finestra mobile di uguali dimensioni a quella impostata per il calcolo dell'indice di scabrezza superficiale, cioè le migliori per rappresentare gli indici calcolati in questa tesi.

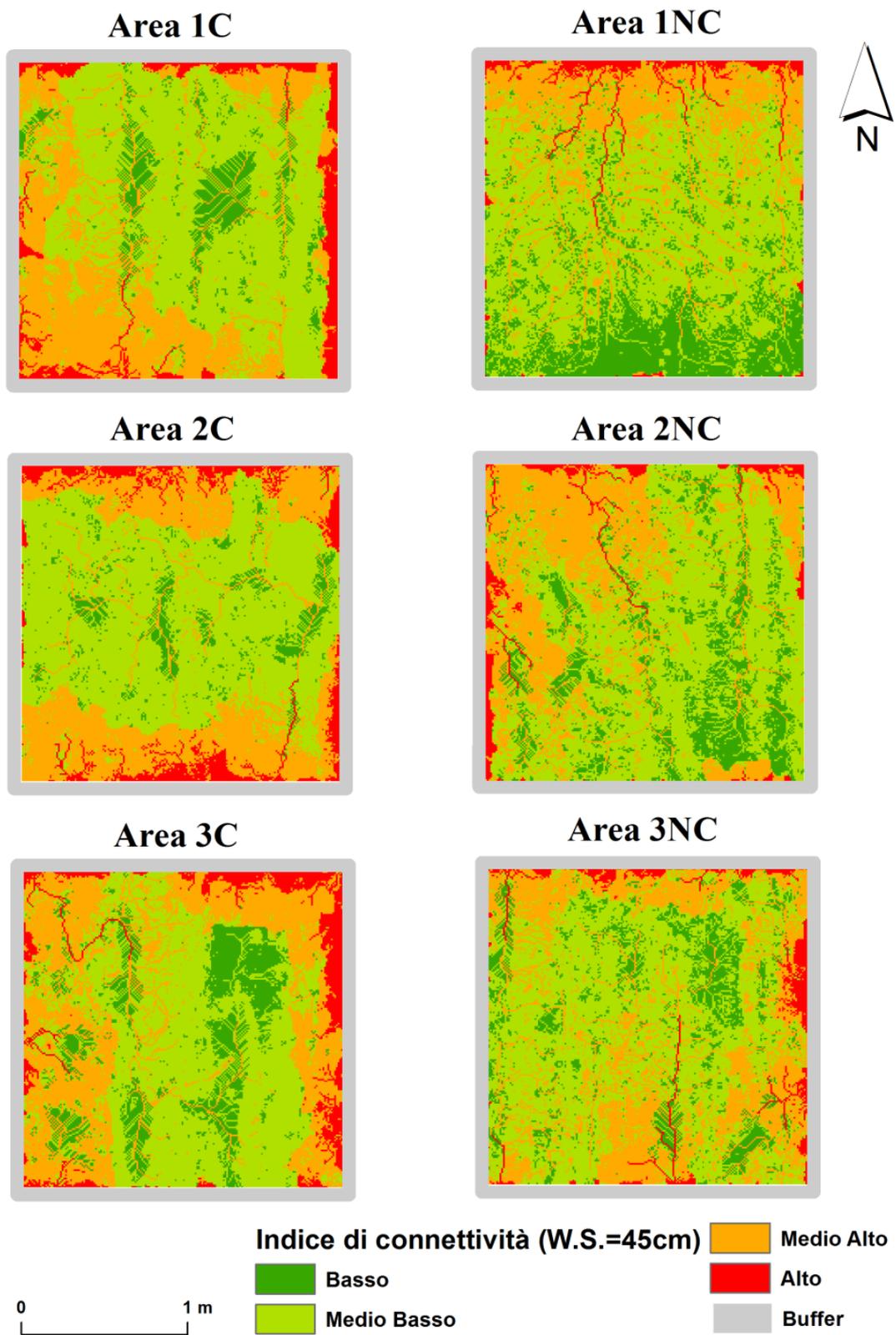


Figura 4.12 Rappresentazione dell'indice di connettività nelle sei aree di studio

L'indice di connettività dell'Area 1C assume valori elevati lungo quasi la totalità del contorno del quadrato rappresentante l'area di studio in oggetto, inoltre, l'angolo in basso a sinistra è caratterizzato da una colorazione arancione corrispondente a un indice di connettività Medio Alto.

L'Area 2C presenta una disposizione dei valori massimi di connettività praticamente simmetrici, infatti, sia nella parte superiore sia in quella inferiore del plot la connettività è indicata dalle classi Medio Alto e Alto. Nella rappresentazione grafica della connettività di quest'area si identificano i due tratti percorsi dai sedimenti trasportati in senso opposto.

Nell'Area 3C, la situazione è più caotica e i valori dell'indice di connettività sono elevati su tre lati del quadrato, mentre solamente nel lato inferiore la connettività è indicata con colore verde, cioè rappresentativo della classe Basso e Medio Basso.

Per quanto riguarda l'Area 1NC, l'indice di connettività assume valori molto alti a mano a mano che ci si avvicina al confine superiore del plot. In quest'area sono anche ben visibili le aree drenate che indirizzano il flusso e i sedimenti verso Nord.

L'Area 2NC è caratterizzata dal colore verde presente sulla quasi totalità della superficie, tuttavia, in corrispondenza del vertice superiore sinistro dell'area di riferimento, si nota una colorazione arancione e rossa pari a valori dell'indice di connettività appartenenti alle classi Medio Alto e Alto.

Infine, l'Area 3NC possiede un indice di connettività elevato in prossimità del lato destro e superiore del contorno dell'area di studio.

Da questa analisi dettagliata dei valori dell'indice di connettività per ognuna delle sei aree, si osserva che le zone interessate da agricoltura convenzionale hanno un indice elevato posizionato nelle vicinanze di solo uno oppure due lati del plot che identifica l'area di studio. Invece, nelle aree coltivate con tecniche conservative, l'indice di connettività assume valori molto alti in corrispondenza di più lati del plot.

Si deduce che il trasporto di sedimenti nelle aree interessate da agricoltura convenzionale è indirizzato verso una specifica direzione, mentre, nelle aree dell'agricoltura conservativa, i sedimenti vengono trasportati con un flusso più caotico che non segue una direzione precisa, ma si muove lungo percorsi multidirezionali, talvolta con verso opposto.

Riflettendo sul fatto che i plots sono di dimensioni ridotte (2×2 m) rispetto ai campi agrari in cui sono stati estratti e che presentano dimensioni molto più grandi (40×200 m), si può affermare che, nel medio-lungo periodo, i sedimenti distaccati dal suolo a causa dell'erosione idrica verranno trasportati verso l'esterno del quadrato nelle aree interessate da agricoltura

convenzionale, invece, saranno trasportati in più direzioni nel caso di aree interessate da agricoltura conservativa. Ciò significa che la maggior parte dei sedimenti che si trovano nelle zone lavorate con tecniche conservative, anche se originatisi dall'erosione del suolo e trasportati dall'acqua durante le abbondanti precipitazioni, finiranno il loro percorso all'interno dello stesso appezzamento di terreno dal quale sono partiti nella maggior parte dei casi, ma potranno anche uscire dal fondo agrario di competenza nel caso in cui la direzione di trasporto sia indirizzata verso i confini del campo agricolo.

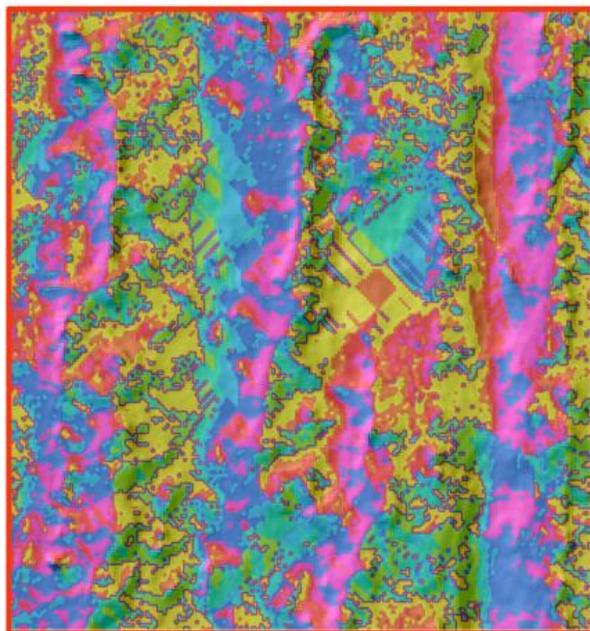
In questo modo è stato spiegato anche il motivo per cui l'adozione di tecniche di lavorazione conservative permette di diminuire sostanzialmente l'erosione del suolo, contrariamente a quanto avviene nei campi coltivati con lavorazioni convenzionali.

4.6 Le direzioni del flusso

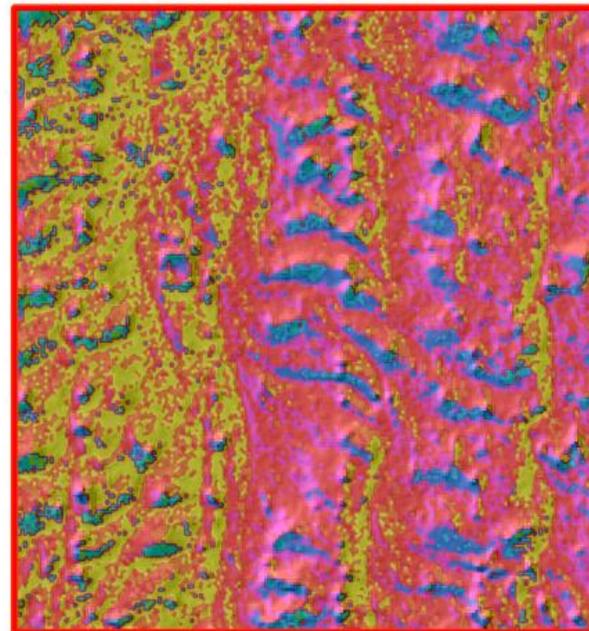
Uno dei parametri più importanti per il raggiungimento degli obiettivi previsti da questa tesi è il calcolo delle direzioni del deflusso.

Nella Figura 4.13 sono riportate le elaborazioni grafiche delle direzioni del flusso, utili alla comprensione della direzione verso cui l'acqua di ruscellamento si muove con il conseguente trasporto di materiale eroso.

Area 1C



Area 1NC



 Area di studio

Direzioni del flusso

 E	 O
 NE	 SO
 N	 S
 NO	 SE

4.13 Rappresentazione delle direzioni del flusso nell'Area 1C e Area 1NC

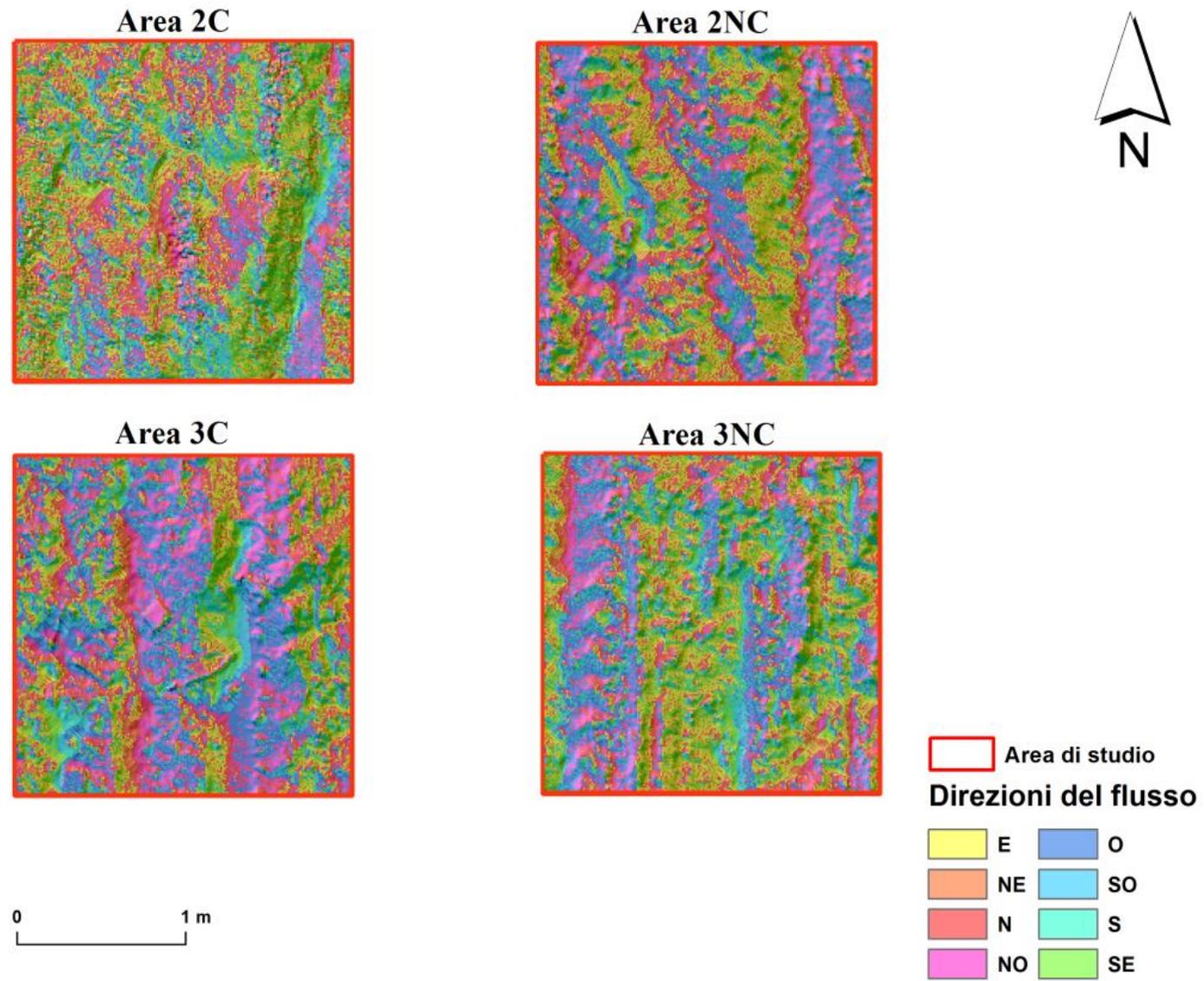
Nell'Area 1C, il deflusso segue più di una direzione, ciò non significa che il trasporto del materiale avvenga verso l'esterno dell'area di riferimento, bensì permette di dichiarare che il flusso è caotico, poiché a una direzione ne corrisponde un'altra contraria.

Detto ciò, si può affermare che il flusso presente in quest'area viene ostacolato, in quanto le direzioni che sono rappresentate maggiormente sono: Nord-Ovest, Sud, Est e Sud-Est.

Per l'Area 1NC il discorso è completamente diverso, infatti, in questo caso la direzione del deflusso principale è verso Nord ed Est, perciò il trasporto di sedimenti segue un movimento che, nella parte sinistra dell'immagine, è prevalentemente verso Est e poi, con l'avvicinarsi alla parte destra, è verso Nord. I sedimenti, perciò, sono trasportati potenzialmente verso l'alto in un'unica direzione e fuoriescono dall'area di studio. Questo movimento si può dedurre anche osservando il DTM e la mappa delle ombre dell'Area 1NC.

Anche per quanto riguarda le altre quattro aree di studio, la direzione del deflusso superficiale segue quanto affermato in precedenza. Nel caso di aree interessate da tecniche conservative, il flusso è ostacolato e segue più direzioni opposte tra loro, nel caso di aree coltivate con metodologie convenzionali, il flusso segue una direzione univoca, quindi, il trasporto dei sedimenti è indirizzato verso l'esterno dell'area stessa.

In Figura 4.14 sono riportate le direzioni del deflusso per l'Area 2C, l'Area 3C, l'Area 2NC e l'Area 3NC.



4.14 Rappresentazione delle direzioni del flusso nelle restanti quattro aree analizzate

Nell'Area 2C, le direzioni del deflusso seguono un andamento confusionario impedendo perciò il trasporto di grosse quantità di materiale eroso all'esterno dell'area di studio. Tuttavia, nella parte destra del plot, si osserva la presenza di una fascia verde corrispondente alla direzione Sud-Est. In questo caso, dando uno sguardo anche al DTM dell'area stessa, si può affermare che la zona corrisponde a una depressione particolarmente rilevante poiché identifica un canale di runoff scavato durante gli eventi piovosi abbondanti che hanno interessato la zona di studio nella stagione precedente a quella dei rilievi fotogrammetrici.

L'Area 3C possiede un deflusso superficiale direzionato principalmente verso Nord-Ovest, Nord ed Est, infatti le colorazioni più presenti sono il viola, il rosso e il giallo, anche se non mancano alcune parti verdi e blu. Ciò significa che, anche in questa circostanza, il flusso è limitato, perciò il trasporto di sedimenti al di fuori dell'area di studio è molto ridotto.

L'Area 2NC presenta deflussi che, scendendo dalle linee delle file di semina con direzione Sud-Est e Nord-Ovest, si incanalano lungo le interfile per poi essere indirizzati verso Nord. La possibilità di sovrapporre le direzioni del deflusso alla mappa delle ombre permette di identificare questa tipologia di percorso.

Nell'Area 3NC il deflusso è prevalentemente indirizzato verso Sud-Est, infatti il colore verde ricopre la maggior parte dell'area. Inoltre, sulla parte sinistra del plot si trova un deflusso direzionato verso Nord-Ovest, ciò è causato dalla presenza di una fila di semina posta a un'altitudine elevata rispetto al resto della superficie.

In conclusione, con l'analisi dettagliata delle direzioni del deflusso presenti in ognuna delle sei aree di studio, è stato dimostrato che nei campi coltivati con tecniche di agricoltura conservativa le perdite di suolo, causate dal trasporto di particelle verso l'esterno, è sostanzialmente limitato rispetto a quello che accade nei campi coltivati con tecniche convenzionali, dove il deflusso segue una direzione univoca perciò il trasporto di sedimenti all'esterno dell'area di riferimento è maggiore.

4.7 L'area drenata

La rappresentazione dell'area drenata, riportata in Figura 4.15, permette di osservare quale sia la grandezza delle porzioni di terreno che sono posizionate a monte di un oggetto che si trova sulla superficie dell'area di studio ed è interessato dal deflusso che percorre la via di discesa verso la linea di fondovalle seguendo le direzioni calcolate con il metodo D_{∞} , descritto nel sottocapitolo 3.2.6.

L'area drenata viene anche definita "area contribuente" poiché si tratta di una porzione topografica della superficie che, partendo dalla zona che si trova a monte di un elemento, si estende fino allo spartiacque relativo contribuendo così alla formazione del deflusso che si trova in corrispondenza dell'elemento oggetto di studio, tuttavia non bisogna dimenticare che la superficie non è impermeabile perciò tale considerazione deve essere interpretata a seconda delle proprietà fisiche del terreno in cui ci si trova perché, non sempre, a valori elevati di area drenata corrisponde un canale di deflusso superficiale ben definito.

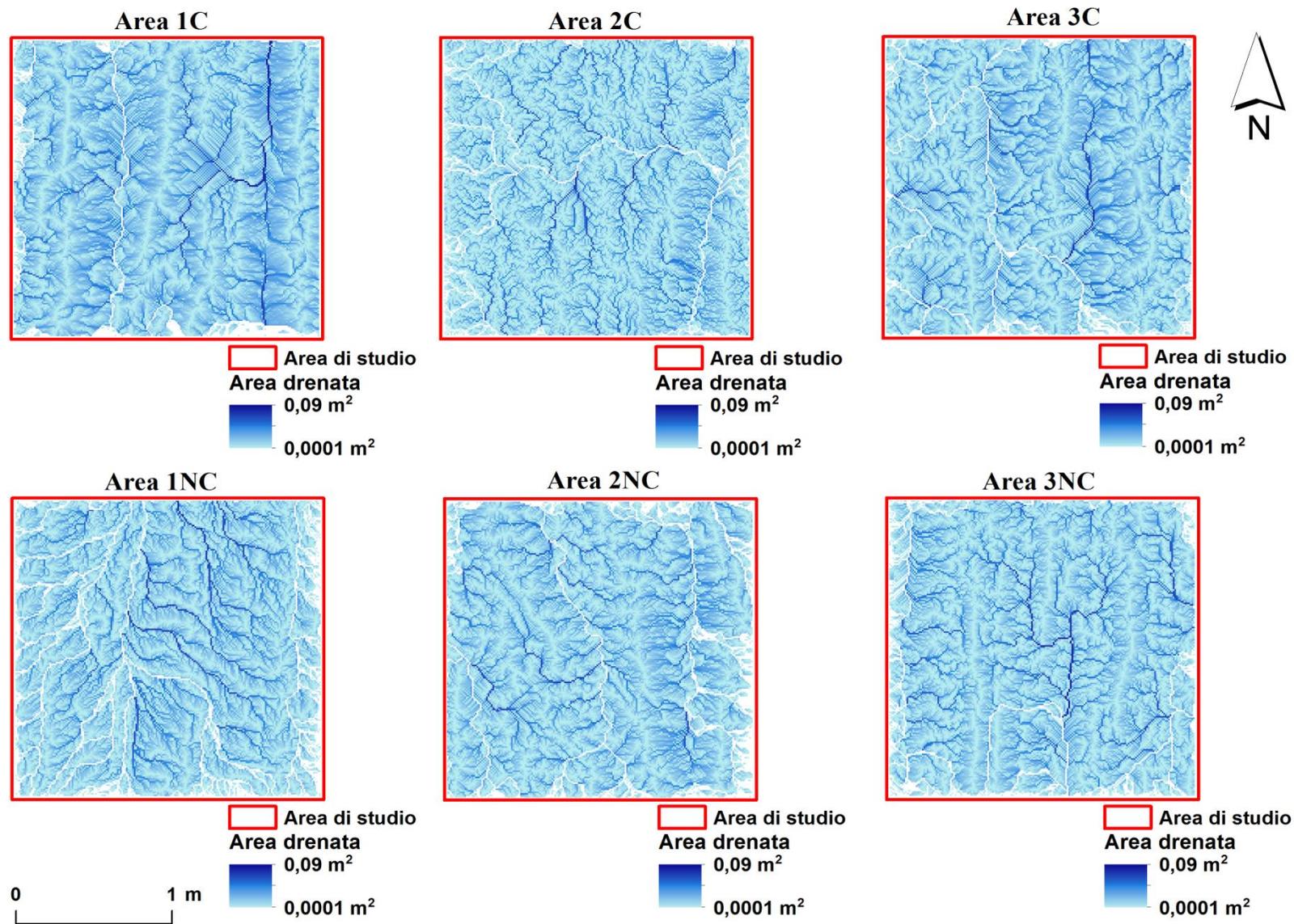


Figura 4.15 Rappresentazione dell'area drenata delle sei aree di studio

Secondo quanto proposto da Tarboton (1997), l'unità di misura utilizzata per il calcolo dell'area drenata specifica è il metro poiché si tratta di una misura della "Specific Catchment Area", ovvero dello specifico bacino d'utenza che interessa l'elemento grafico di riferimento, che viene calcolata per ogni cella (area/cella, m^2/m).

In questo caso, invece, abbiamo voluto calcolare l'area drenata che quindi è stata rappresentata in metri quadrati. Per quanto riguarda la rappresentazione grafica dei valori delle sei aree di studio, si nota che i valori minimi per ognuna delle aree corrispondono a $0,0001 m^2$, che è anche la dimensione di ogni area della singola cella, mentre i valori massimi invece si aggirano intorno a $0,09 m^2$.

In questa circostanza, i valori massimi dell'area drenata per ogni singola area di studio non corrispondono all'area totale coperta da ciascuna zona di studio ($4 m^2$), come ci si aspetterebbe nel caso del calcolo dell'area contribuente di un bacino idrografico. Ciò è spiegato dal fatto che la zona sotto analisi non presenta le caratteristiche di un vero e proprio bacino idrografico, infatti, non è delimitata da una linea di spartiacque e i flussi non confluiscono tutti insieme verso una sola sezione di chiusura, detta "outlet".

Nelle sei aree di studio rappresentate nella Figura 4.15, la colorazione prevalente è l'azzurro; questo, però, non significa che in quella particolare zona della superficie ci sia dell'acqua e che quest'ultima convogli tutta quanta in una direzione a formare un canale di deflusso definito. Infatti, in questa circostanza, bisogna tenere conto anche della permeabilità che caratterizza il terreno e fa penetrare l'acqua nel sottosuolo.

Per questo motivo, è importante ricordare che, con molta probabilità, solo nel caso in cui il terreno risulti totalmente impermeabile, un valore elevato dell'area drenata corrisponde alla formazione di un canale di deflusso di particolari dimensioni; tuttavia questa situazione in natura e nei campi agrari è molto rara.

Nell'Area 1C si osserva la presenza di valori elevati e ben definiti lungo la parte destra del quadrato che delimita l'area di studio. Questo è dovuto al fatto che in quella porzione di terreno ci sia stato il passaggio delle ruote della macchina trattrice utilizzata durante le operazioni di semina e che ha causato una profonda depressione sulla superficie.

Nell'Area 2C il calcolo dell'area drenata ha portato all'ottenimento di valori non particolarmente elevati e, soprattutto, si nota un flusso caotico e non diretto verso direzioni univoche, in accordo con quanto dimostrato durante la discussione dei risultati relativi alle direzioni del flusso nell'area di studio stessa.

Come per l'Area 1C, anche nell'Area 3C ci sono dei valori elevati dell'area drenata in prossimità della parte destra dell'area di studio. In questo caso, però, la causa di questo avvenimento è dovuta alla presenza di una fila di coltura molto elevata rispetto al resto dell'area sottoposta

all'analisi, come dimostrato nella Figura 4.6, dove sono riportati i modelli digitali del terreno di ogni area e la loro relativa elevazione sul livello del mare.

Nell'Area 1NC, i dati più elevati si trovano nella parte centrale dell'area di studio e sono orientati verso Nord, proprio come si può osservare nella Figura 4.13, in cui sono indicate le direzioni principali del flusso all'interno di questa zona.

Per l'Area 2NC, i valori più alti dell'area drenata, seppur inferiori rispetto a quanto mostrato nelle altre cinque aree di studio, si trovano sparsi su tutta la superficie. Se si osserva il DTM e la rappresentazione delle direzioni del flusso di quest'area mostrati nei sottocapitoli precedenti, ci si accorge che l'area drenata assume i massimi valori in corrispondenza dell'alternanza fra le linee di interfila e quelle delle file di coltura..

Infine, nell'Area 3NC, si nota che, in prossimità della parte sinistra della zona da analizzare, si trova una linea parallela al contorno sinistro del quadrato, in cui i valori relativi all'area drenata sono bassi e, perciò, assumono una colorazione azzurra tendente al bianco. In questo caso, ci si trova in coincidenza con una linea di coltura molto più alta rispetto al resto dell'area di studio. A destra di tale linea, l'area drenata è indirizzata principalmente verso Sud-Est, come confermato da quanto dichiarato nel sottocapitolo inerente alle direzioni del flusso.

Anche dopo aver calcolato e discusso i risultati relativi a questo indice sembrerebbe che, nelle aree interessate da tecniche di agricoltura no-tillage, il percorso che segue l'area drenata è prevalentemente multidirezionale, tranne nel caso in cui ci siano delle depressioni provocate dal passaggio dei macchinari agricoli o altre cause. Nel caso di aree coltivate con metodi convenzionali, invece, la situazione è diversa poiché il calcolo dell'area drenata mostra una certa unidirezionalità che potrebbe corrispondere con un flusso superficiale più erosivo, in quanto indirizzato verso l'esterno dell'area stessa. Questa affermazione corrisponde anche con quanto affermato durante l'analisi dell'indice di connettività. Tuttavia, bisogna sempre ricordare che ogni area di studio copre un'area di appena 4 m², che coincidono solamente con una piccolissima porzione dell'intero campo agrario a cui fanno riferimento. Servono perciò ulteriori studi sito-specifici e su grande scala per poter confermare con assoluta certezza ciò che è stato dichiarato e calcolato per le sei aree di studio analizzate in questa tesi.

4.8 Analisi statistica

Con l'utilizzo delle funzioni del software MATLAB, sono stati calcolati i valori della media, del massimo, del minimo, della mediana, della deviazione standard e della skewness per le sei aree relativamente alla curvatura media, all'indice di scabrezza superficiale e all'indice di connettività, al fine di poter constatare statisticamente la veridicità delle informazioni ricavate dall'analisi visiva delle rappresentazioni grafiche di questi tre parametri.

Per quanto riguarda il calcolo statistico della curvatura, l'attenzione si è focalizzata sulla sola curvatura media. Questo perché l'obiettivo principale dell'analisi statistica può essere raggiunto analizzando la curvatura media che rappresenta i valori medi tra quelli che sono stati ottenuti dalla curvatura massima e quelli trovati con il calcolo della curvatura minima.

Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori della media, della mediana, del punto di massimo, del punto di minimo, della deviazione standard e della skewness relativi al parametro della curvatura media (C.M.) per ciascuna delle sei superfici oggetto di studio.

Tabella 4.1 I dati calcolati con MATLAB relativamente alla curvatura media delle sei aree

VALORI C.M.	AREA 1C	AREA 2C	AREA 3C	AREA 1NC	AREA 2NC	AREA 3NC
<i>Media</i>	-0,0115	0,0045	0,0247	-0,0156	-0,0089	0,023
<i>Massimo</i>	0,5544	0,8803	1,037	0,1977	0,2586	0,3167
<i>Minimo</i>	-0,7773	-0,904	-0,8812	-0,2145	-0,3532	-0,2609
<i>Mediana</i>	0,0057	0,0034	0,0167	-0,0176	0,0075	0,0213
<i>Dev.st.</i>	0,282	0,2636	0,3455	0,0673	0,1194	0,1159
<i>Skewness</i>	-0,1408	-0,1904	0,19	0,1539	-0,4357	-0,0079

Dall'analisi del valore medio si può comprendere se la superficie in oggetto sia maggiormente concava verso l'alto oppure più convessa verso l'alto, questo è possibile poiché, come spiegato nel capitolo inerente ai materiali e metodi utilizzati per la tesi, un valore negativo della curvatura media indica una zona caratterizzata prevalentemente da una convessità verso l'alto, invece, un valore positivo indica una zona caratterizzata principalmente da una concavità verso l'alto. Sebbene i valori della media presenti nella Tabella 4.1 siano molto vicini allo zero, sarebbe errato affermare che la superficie abbia una curvatura nulla e quindi essa sia di tipo lineare, perché il valore medio fa riferimento a un insieme composto da molte celle che presentano differenti indici di curvatura.

L'Area 3C presenta un range di valori compreso tra il valore minimo e quello massimo molto più ampio rispetto alle altre aree sotto analisi, non da meno, le aree 1C e 2C che comunque

presentano un intervallo di valori ben più grande rispetto a quello delle tre aree interessate da agricoltura di tipo convenzionale. Da ciò si può affermare che il grado di concavità e convessità presente nelle zone scelte nel campo agrario coltivato con tecniche conservative è molto maggiore rispetto alle aree estratte dal campo trattato con tecniche convenzionali, perciò, la morfologia superficiale è anche più ruvida e presenta numerose ondulazioni che ostacolano la formazione di canali di ruscellamento durante gli eventi piovosi, permettendo al terreno di impregnarsi d'acqua convogliandola verso le depressioni degli strati meno profondi.

Dall'analisi dei grafici riportati in Figura 4.16, raffiguranti la distribuzione dei dati relativi alla curvatura per ognuna delle sei aree, si nota che l'indice di asimmetria, detto anche skewness, assume valori molto bassi, eccetto nell'Area 2NC dove, invece, corrisponde a -0,4357, che è comunque un numero basso se confrontato con la skewness degli altri indici calcolata successivamente.

Per quanto riguarda l'indice di asimmetria, particolare attenzione deve essere dedicata al fatto che un valore molto simile di skewness fra due aree non corrisponde a una somiglianza della distribuzione dei valori relativi alle due aree stesse, bensì identifica la disposizione dei valori intorno al valore della mediana. Quindi, sebbene l'indice di asimmetria, riportato nella tabella sovrastante, possa essere considerato simile sia per le aree interessate da agricoltura conservativa sia per le aree lavorate con tecniche convenzionali, i grafici seguenti permettono di osservare che la distribuzione dei valori in ascissa assume un'ampiezza molto maggiore nelle aree conservative in confronto con le aree non conservative.

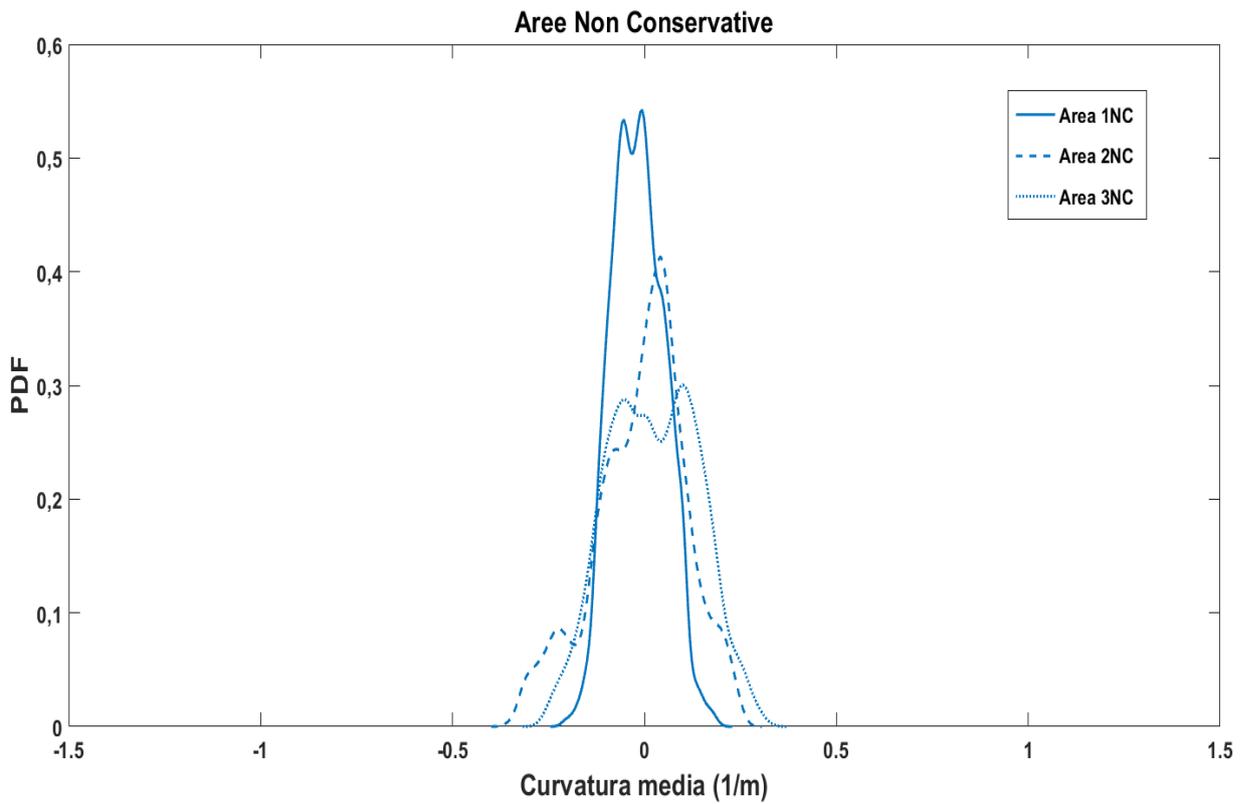
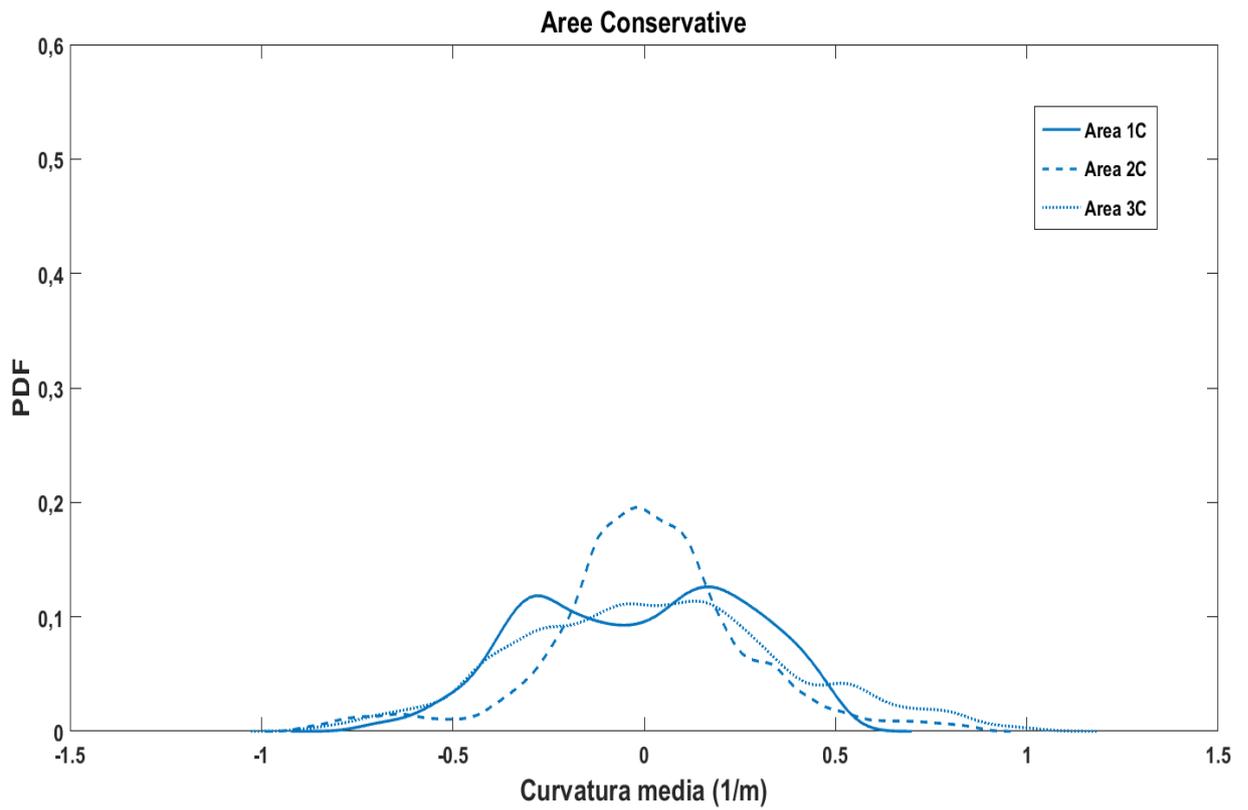


Figura 4.16 I grafici relativi alla curvatura media calcolata per le sei aree di studio

In Figura 4.16, il valore massimo della PDF è stato impostato a 0,6 per permettere un confronto più semplice e intuitivo tra le aree di studio. Come si nota, le aree conservative presentano classi di valori più ampie, ma meno frequenti, se paragonate alle aree interessate da tecniche di lavorazione convenzionale, perciò la loro superficie risulterà essere più caotica con una più intensa alternanza di depressioni concave e convesse verso l'alto.

Dall'analisi dei boxplots evidenziati in Figura 4.17, si può osservare che l'ammontare complessivo dei valori outlier è molto ridotto se confrontato con quanto mostrato per l'indice di scabrezza superficiale e l'indice di connettività.

Infatti, in questo caso, i simboli “+” rossi non si trovano in molti boxplots, perciò la misurazione comprende parecchi numeri vicini tra loro e caratterizzati da una similarità reciproca.

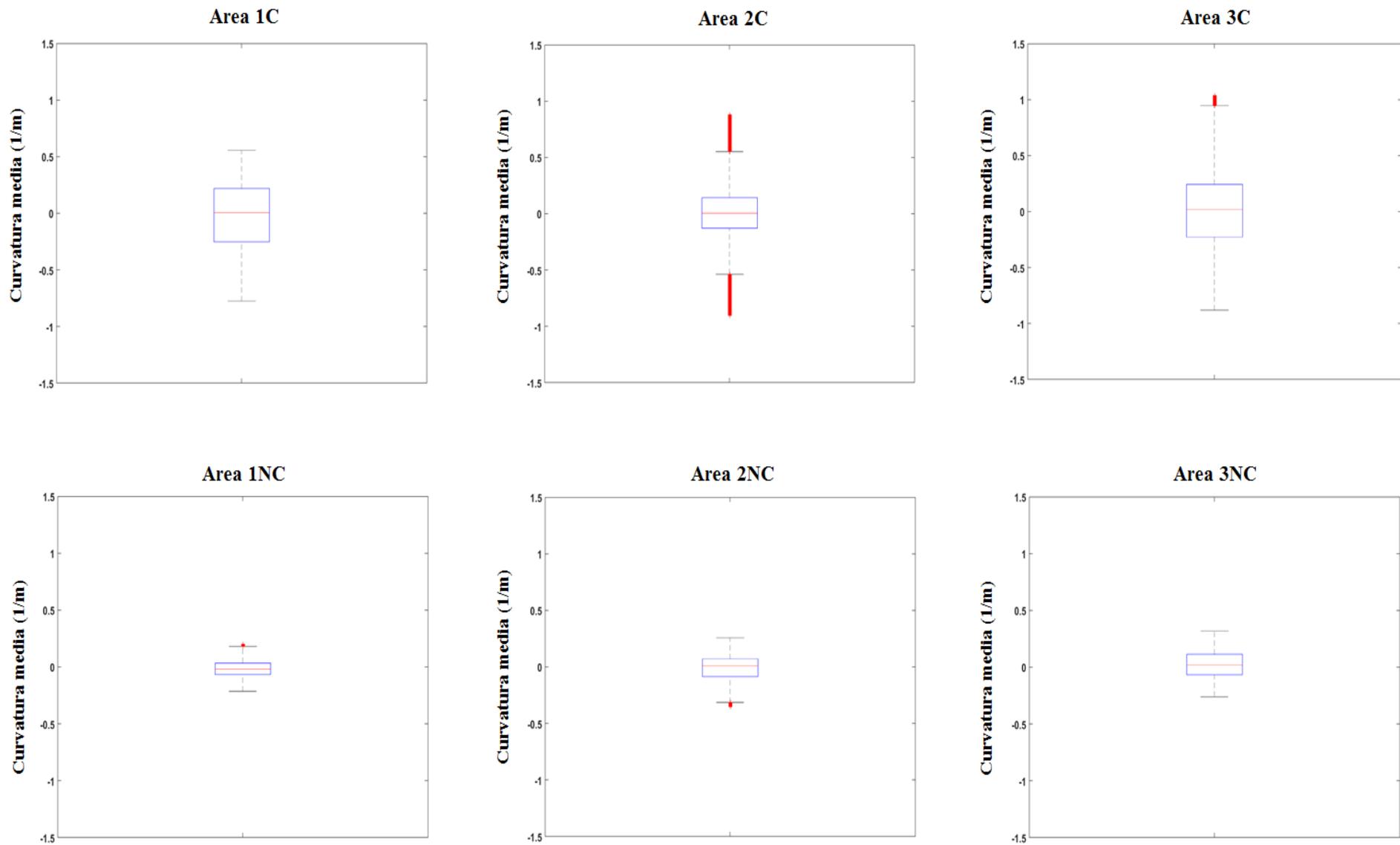


Figura 4.17 Rappresentazione dei boxplots relativi alla curvatura media presente nelle sei aree analizzate

La linea della mediana è quasi sempre posta al centro del rettangolo azzurro, proprio perché la skewness assume valori molto bassi. Inoltre, la deviazione standard non assume valori superiori a 0,4; questo significa che i dati della popolazione di punti relativi alla curvatura media sono concentrati all'interno di valori massimi e minimi relativamente vicini tra loro.

Analizzando il valore massimo e il valore minimo della distribuzione dei dati si osserva che, nelle aree conservative, la loro distanza è maggiore rispetto a quella che si osserva nelle aree convenzionali. Questo avvalorava quanto detto in precedenza, ossia che la morfologia superficiale del campo conservativo è più ruvida e presenta numerose variazioni di pendenza che ostacolano l'erosione del suolo tramite ruscellamento superficiale.

Nella Tabella 4.2 sono riportati i dati relativi all'indice di scabrezza superficiale (I.S.S.), presente nelle sei aree analizzate con una finestra mobile di dimensioni 45×45 cm, cioè la misura ritenuta più opportuna per il calcolo di questo indice nel caso in cui le features abbiano una grandezza di circa 15 cm.

Tabella 4.2 I dati calcolati con MATLAB relativamente all'indice di scabrezza superficiale delle sei aree

VALORI I.S.S.	AREA 1C	AREA 2C	AREA 3C	AREA 1NC	AREA 2NC	AREA 3NC
<i>Media</i>	0,0069	0,0066	0,0068	0,0022	0,0030	0,0034
<i>Massimo</i>	0,0166	0,0158	0,0165	0,0043	0,0100	0,0082
<i>Minimo</i>	1,43E+09	2,67E+10	4,96E+10	2,34E+10	3,62E+10	4,95E+11
<i>Mediana</i>	0,0069	0,0061	0,0062	0,0021	0,0028	0,0033
<i>Dev.st.</i>	0,0028	0,0027	0,0029	5,01E+11	0,0011	9,30E+11
<i>Skewness</i>	0,2287	0,8605	0,9589	0,5013	1,1755	0,5824

Osservando i valori della media si può affermare che, nell'Area 1C, 2C e 3C, cioè quelle interessate da tecniche di lavorazione previste dall'agricoltura conservativa, l'indice di scabrezza superficiale assume un valore quasi triplo rispetto a quello che si può trovare nelle aree 1NC, 2NC e 3NC, caratterizzate invece da una scabrezza non molto elevata causata dall'adozione di tecniche di coltivazione convenzionali.

I dati relativi alla mediana, ovvero il valore intermedio fra gli estremi di una successione, mostrano alcuni numeri molto vicini a quelli riportati nella riga della media, ciò significa che la distribuzione dei valori presenti nelle varie aree analizzate è uniforme e senza errori particolarmente fastidiosi causati dalla dimensione delle features oppure da problemi durante la fase di ricostruzione delle nuvole di punti iniziale.

Da ciò, si può affermare che la pulizia manuale effettuata con CloudCompare è stata effettuata correttamente. Questo è dimostrato anche dai valori della deviazione standard, ossia la stima della variabilità di una popolazione di dati, che in tutte le sei aree sono relativamente bassi.

L'indice di asimmetria è un valore che fornisce una misura della mancanza di simmetria presente in una distribuzione. I valori riportati in tabella per questo parametro statistico risultano molto diversi tra loro, infatti, da un'analisi dei grafici ottenuti con MATLAB e riportati in Figura 4.18 si possono osservare le diverse disposizioni dei dati.

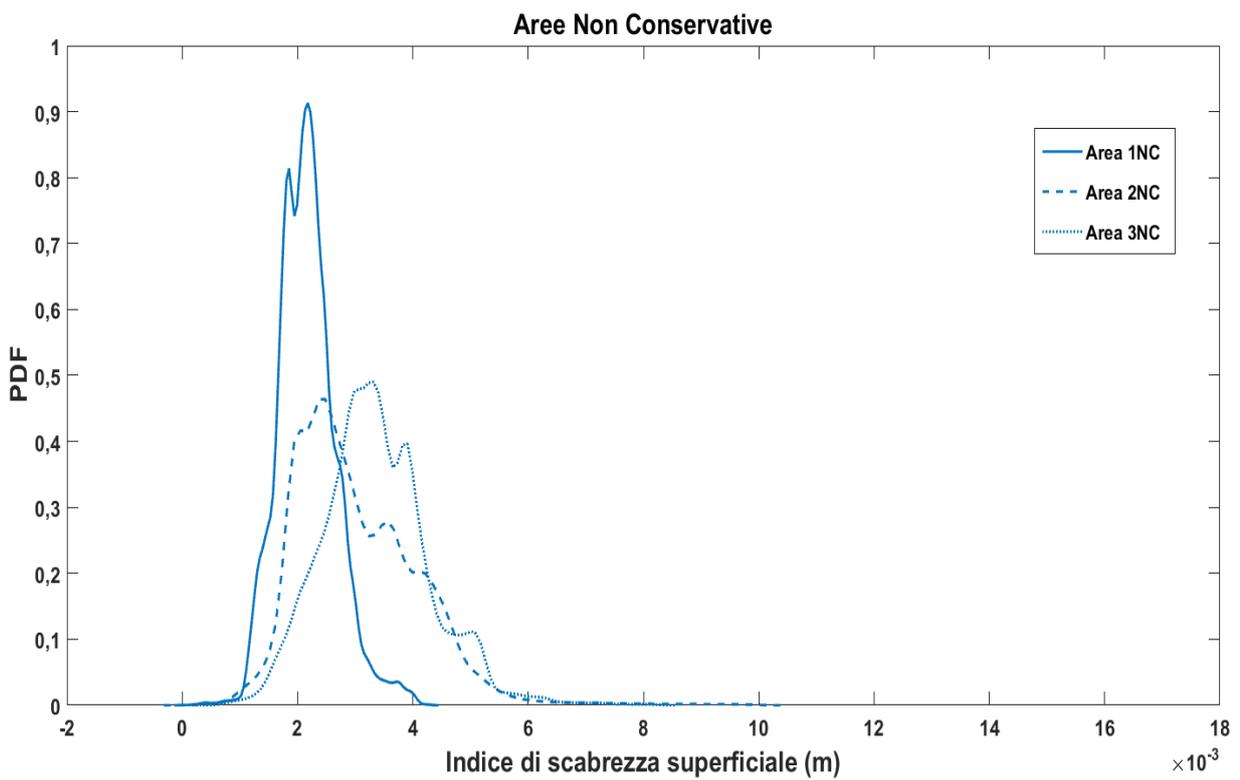
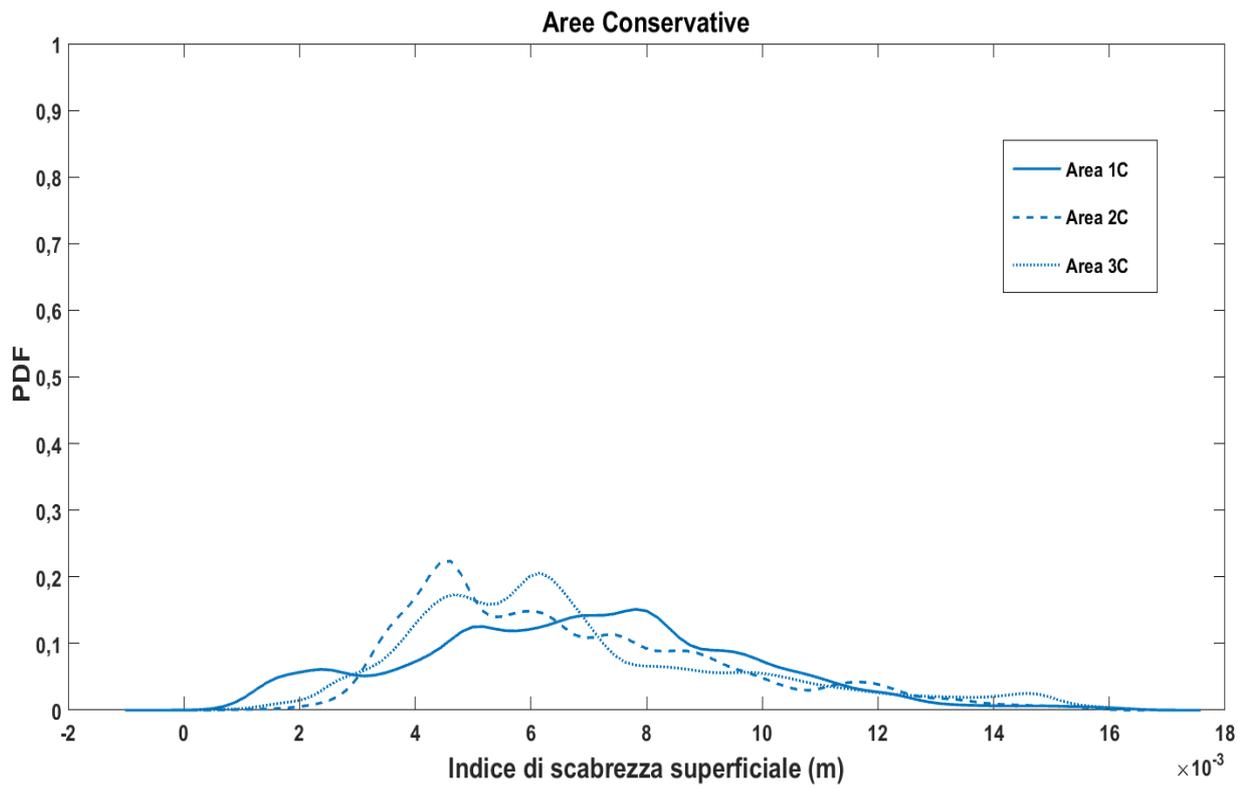


Figura 4.18 I grafici delle distribuzioni dei punti e i loro relativi valori dell'indice di scabrezza superficiale

Dalla figura sovrastante si osserva una maggiore asimmetria nelle immagini delle aree 2C, 2NC e 3C, proprio come riportato nella Tabella 4.2. Questo indica, ancora una volta, che i calcoli effettuati risultano essere corretti, anche se non bisogna dimenticare che possono essere presenti alcuni errori dovuti al cosiddetto “effetto smoothing” che interessa le aree di studio in cui è stata utilizzata la finestra mobile.

Inoltre, la PDF calcolata per gli indici di scabrezza superficiale nelle aree interessate da semina su sodo è molto inferiore se paragonata a quella delle corrispondenti aree trattate con agricoltura convenzionale, le quali presentano valori massimi più elevati e, nel caso dell'Area 1NC, quasi vicini a 1, cioè alla probabilità che la classe di valori rappresentati in ascissa sia certamente compresa in un preciso intervallo. Tuttavia, ai fini del raggiungimento degli scopi previsti da questa tesi, è importante focalizzare l'attenzione sull'ampiezza delle classi che contraddistinguono i valori dell'asse orizzontale nei grafici, in cui si possono notare valori maggiori di scabrezza superficiale nelle aree conservative rispetto a quelle lavorate in modo convenzionale.

Nello specifico, il valore più probabile dell'indice di scabrezza superficiale per l'Area 1C è compreso tra 6 e 8 m, quello dell'Area 2C e 3C, invece, è più probabile sia compreso tra valori che appartengono alla classe compresa tra 4 e 5 m.

Per quanto riguarda le aree conservative, l'Area 1NC ha quasi una probabilità certa che l'indice di scabrezza superficiale abbia valore 2 m, mentre per l'Area 2NC e 3NC la classe più probabile è quella compresa tra 2 e 4 m.

Sono stati costruiti anche i sei boxplots inerenti all'indice di scabrezza superficiale presente nelle sei aree e riportati nella Figura 4.19.

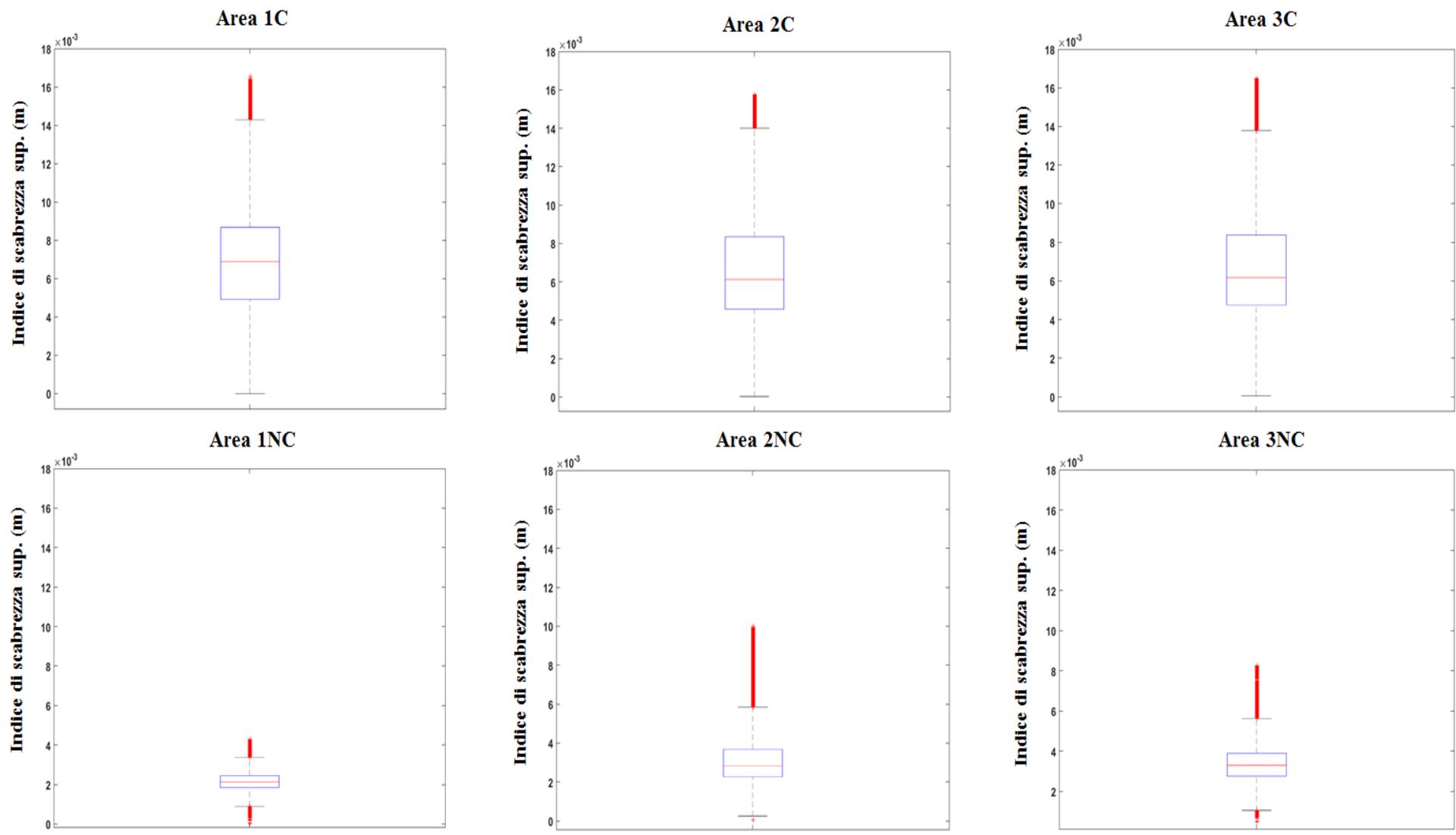


Figura 4.19 Rappresentazione dei boxplots relativi all'indice di scabrezza superficiale nelle sei aree analizzate

Nei boxplots delle aree 2C, 3C e 2NC, si può notare che la skewness influenza la posizione della linea rossa, corrispondente alla mediana, che si trova comunque all'interno del rettangolo azzurro, ma non è posta al centro dello stesso, come invece avviene nelle altre tre aree in cui l'indice di asimmetria assume valori molto bassi.

I vari simboli “+” di colore rosso esterni ai bordi del boxplot azzurro sono gli outliers che, trovandosi all'esterno dei valori ritenuti utili e idonei alle misurazioni, non vengono conteggiati durante il calcolo degli indici in quanto superano di 1,5 volte l'intervallo interquartile superiore o inferiore del box stesso.

Il limite superiore del rettangolo azzurro corrisponde al venticinquesimo percentile dell'insieme dei dati analizzati, al contrario, il limite inferiore si trova in prossimità del settantacinquesimo percentile del gruppo di valori esaminati.

Nella Tabella 4.3 sono rappresentati i valori di media, massimo, minimo, mediana, deviazione standard e indice di asimmetria relativi al parametro geomorfometrico dell'indice di connettività (I.C.), calcolato con una finestra mobile 45×45 cm.

Tabella 4.3 I dati calcolati con MATLAB relativamente all'indice di connettività delle sei aree

VALORI I.C.	AREA 1C	AREA 2C	AREA 3C	AREA 1NC	AREA 2NC	AREA 3NC
<i>Media</i>	-4,7975	-4,9769	-4,8601	-5,061	-5,3641	-5,149
<i>Massimo</i>	-0,133	-0,2824	-0,3158	-0,8877	-0,3772	-1,0437
<i>Minimo</i>	-7,0285	-8,0123	-8,599	-7,262	-7,4347	-7,3957
<i>Mediana</i>	-4,9368	-5,2227	-4,9402	-5,1303	-5,432	-5,1797
<i>Dev.st.</i>	0,9161	1,0106	0,9564	0,5931	0,6941	0,6612
<i>Skewness</i>	0,8522	0,5266	0,47	1,0591	0,8798	0,7834

Per la comprensione dei valori relativi all'indice di connettività si è dovuto analizzare il limite minimo e massimo di ognuna delle quattro classi (Basso, Medio Basso, Medio Alto, Alto) in cui sono stati suddivisi i valori degli indici di connettività per ognuna delle sei aree analizzate, secondo quanto affermato da Tarolli e Sofia (2016).

In base al valore della media riportato nella Tabella 4.3, si è potuto scoprire quale è l'indice di connettività maggiormente diffuso nell'area di riferimento, osservando all'interno di quale intervallo di valori, che va a caratterizzare ognuna delle quattro classi identificative, si trova il dato relativo alla media stessa.

La media dei valori presente nell'Area 1C ricade nell'intervallo compreso tra -4,73 e -5,78, corrispondente a un indice di connettività Medio Basso. Infatti, nella Figura 4.12, il colore che

prevale su tutta l'area è il verde chiaro che, in legenda, equivale al livello Medio Basso di questo parametro.

L'Area 2C ha una media che ricade nell'intervallo di valori tra -4,86 e -6,16, cioè con indice di connettività Medio Basso, come si osserva anche nella rappresentazione grafica di Figura 4.12.

Per quanto riguarda l'Area 3C, la sua media si trova in corrispondenza del valore Medio Basso, compreso tra -4,76 e -5,77. In questo caso però il colore verde chiaro non è evidentemente il colore prevalente nella zona, tuttavia si può osservare che sono presenti colorazioni verdi scuro (Basso) e arancioni (Medio Alto) in gran parte del plot. Ciò spiega il perché di un valore medio che corrisponde a un valore Medio Basso di connettività.

Nell'Area 1NC, l'indice di connettività ha un valore medio di -5,06 compreso nell'intervallo che va da -4,83 a -5,46, cioè Medio Basso, proprio come evidenziato nella rappresentazione grafica dell'indice di connettività in quest'area.

L'Area 2NC, invece, possiede una media di valori coincidente con la classe dell'indice Medio Basso, compresa tra i valori -5,19 e -5,94.

L'Area 3NC ha una media di circa -5,15 che ricade all'interno dell'intervallo compreso fra i valori -5 e -5,75, corrispondente al livello Medio Basso del parametro analizzato.

In sintesi, tutte le sei aree possiedono un valore medio dell'indice di connettività posto all'interno dei valori massimi e minimi che identificano la classe Medio Basso, appositamente costruita per la rappresentazione dell'indice in questione. Ciò significa che il potenziale legame esistente tra l'origine dei canali di runoff e il relativo trasporto dei sedimenti in varie direzioni verso la zona di fondovalle non assume valori alti se si considera tutta la superficie del plot di riferimento.

La creazione della zona di buffer in corrispondenza del contorno del quadrato 2×2 m impostata con un'ampiezza di 8 cm, 4 cm verso l'interno del plot e altri 4 cm verso l'esterno dello stesso, ha permesso di ridurre al minimo le problematiche connesse all'effetto di bordo che influenzavano il calcolo dell'indice suddetto. La scelta della dimensione della zona di buffer, è risultata idonea al fine di ottenere un'analisi di questo parametro come richiesto dagli obiettivi prestabiliti nell'introduzione della tesi, poiché è stato dimostrato che, nella maggior parte dei casi, la connettività presente nelle zone di confine dei plots interessati da agricoltura conservativa segue più direzioni, invece, nelle aree lavorate in maniera convenzionale la connettività si sviluppa principalmente verso un'unica direzione.

Secondo quanto dichiarato da Cavalli et al. (2008), l'indice di connettività è adimensionale, pertanto non possiede un'unità di misura specifica, per questo motivo i valori riportati in Figura 4.20 non possiedono alcun riferimento al sistema di misura internazionale.

Nella Figura 4.20 sono riportati i grafici relativi al calcolo dell'indice di connettività nelle sei aree analizzate.

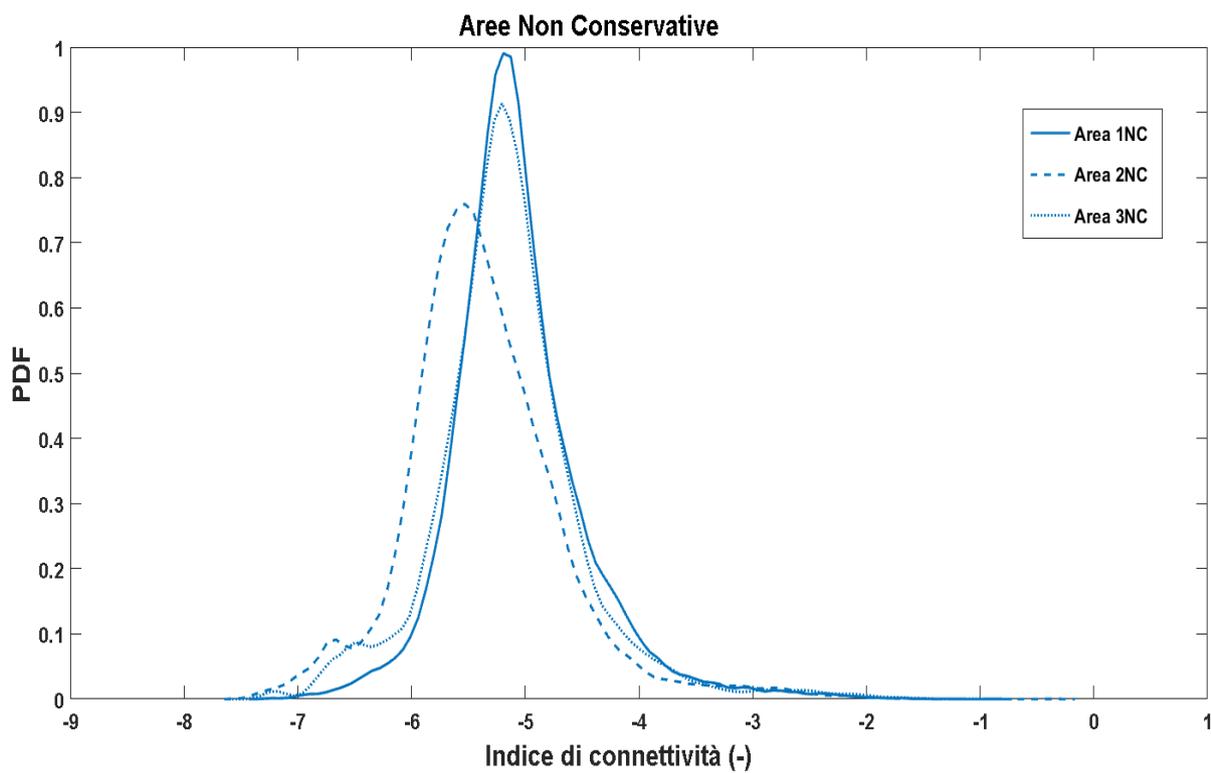
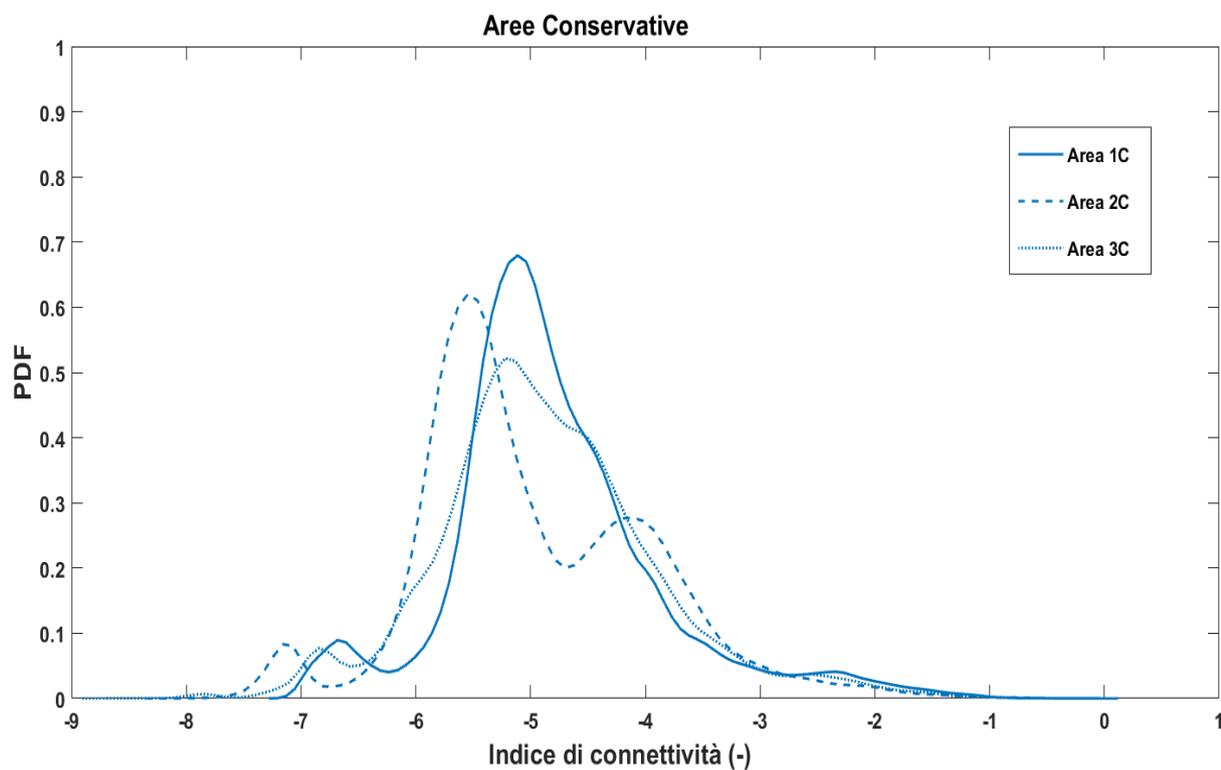


Figura 4.20 I grafici relativi all'indice di connettività calcolato per le sei aree di studio

La deviazione standard nelle aree interessate da agricoltura conservativa si avvicina al valore 1, mentre, per le aree interessate da tecniche di lavorazione convenzionale, questa assume valori intorno allo 0,6. Con questo dato si può comprendere che i valori presenti nelle aree 1C, 2C e 3C godono di una dispersione maggiore rispetto alle aree interessate da agricoltura convenzionale, proprio come si nota nella Figura 4.20.

Da ciò, si presuppone che la connettività nelle aree conservative assume un intervallo di valori più ampio rispetto alle zone del campo agrario coltivato convenzionalmente, le quali, invece, possiedono valori più vicini tra loro e più uniformi lungo tutta la superficie d'interesse.

Infatti, secondo la definizione della deviazione standard, definita anche scarto quadratico medio, con questo parametro si indica quanto ogni valore sia lontano dal valore medio di tutti i dati ed è, perciò, la media ponderata degli scarti dalla media aritmetica elevati al quadrato.

L'analisi dei valori della PDF ottenuti per le sei aree di studio mostra che, nei grafici delle zone interessate da lavorazioni del terreno con tecniche tradizionali, la funzione di probabilità di densità assume valori molto elevati e tendenti a 1 nelle aree 1NC e 3NC in corrispondenza della classe con un indice di connettività -5, mentre nelle zone interessate da semina su sodo la PDF ha il suo massimo valore con l'Area 1C, cioè 0,7, nella classe di valori compresa tra -4 e -6. Questo significa anche che, nonostante i valori calcolati per l'indice di connettività siano comunque molto simili sia per le aree interessate da tecniche di no-tillage sia per quelle interessate da tecniche convenzionali, la probabilità che il valore dell'indice di connettività appartenga a una specifica classe è maggiore nelle aree non conservative rispetto a quelle conservative.

Nella Figura 4.21 sono riportati i boxplots ottenuti con MATLAB per ognuna delle sei aree.

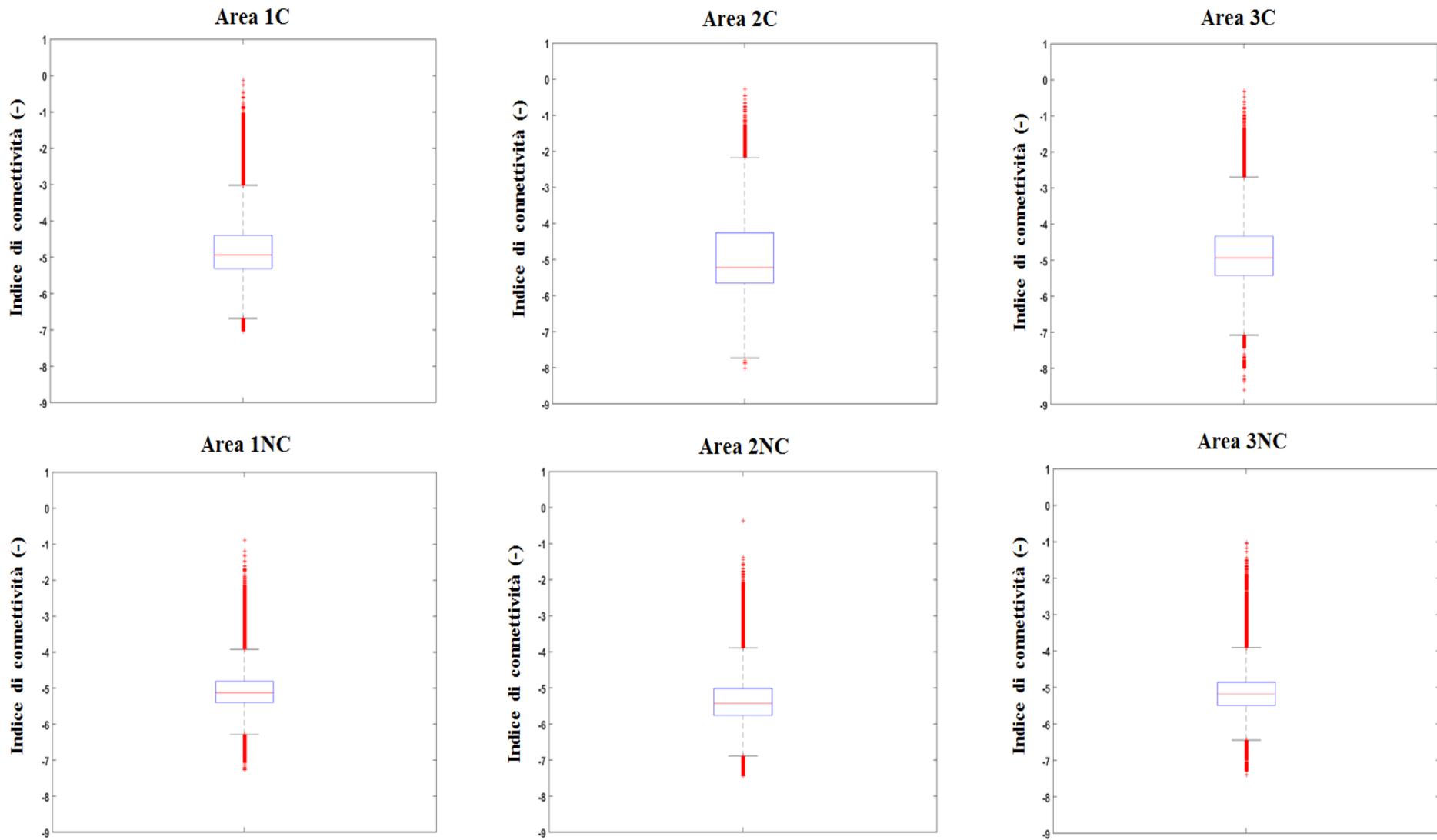


Figura 4.21 Rappresentazione dei boxplots relativi all'indice di connettività nelle sei aree analizzate

Anche in questo caso, come per i boxplots relativi all'indice di scabrezza superficiale, si nota che la linea della mediana non si trova nella posizione centrale del rettangolo azzurro in più aree. Ciò significa che queste sono caratterizzate da un indice di asimmetria particolarmente elevato. Infatti, gli indici di asimmetria minori, riportati nella Tabella 4.3, si trovano nell'Area 2C e 3C, ma sono comunque particolarmente elevati. Nelle altre quattro aree, la skewness assume valori più alti, specialmente nell'Area 1NC, dove l'asimmetria ha un valore di circa 1,06.

5. Conclusioni

L'analisi dei parametri geomorfologici delle sei aree di studio ubicate all'interno dell'Azienda Agraria Sperimentale "L. Toniolo" e interessate da tecniche di agricoltura convenzionali e di semina su sodo, ha permesso di affermare che, grazie all'utilizzo della recente tecnica fotogrammetrica SfM a elevata risoluzione, gli indici morfometrici della superficie nelle tre aree convertite all'agricoltura conservativa presentano alcune variazioni rispetto a quanto dimostrato dagli stessi indici calcolati nelle tre aree trattate con tecniche convenzionali.

Le analisi della geomorfologia superficiale nelle sei aree di studio sono state rese possibili con l'utilizzo della rappresentazione topografica a elevata risoluzione del terreno ottenuta attraverso l'impiego delle tecnologie di telerilevamento o remote-sensing, in particolare della tecnica fotogrammetrica SfM, con cui è stato possibile ricostruire i modelli digitali di ciascuna area per studiarne la morfologia superficiale in maniera non invasiva e in tempi relativamente brevi.

La tecnica SfM è una tecnica di remote-sensing innovativa e a basso costo, inoltre non richiede particolari conoscenze scientifiche e hardware sofisticati, perciò è di facile utilizzo. Questa tecnica ha dimostrato un'ottima efficacia e una buona fattibilità del suo utilizzo per gli scopi previsti dalla tesi poiché ha permesso di ottenere dei modelli digitali del terreno con una risoluzione elevata portata fino a 1 cm, la quale ha consentito di effettuare uno studio dettagliato degli indici morfometrici di particolare interesse.

Grazie all'analisi dei risultati ottenuti per ognuno dei parametri topografici, è stato osservato che, già solamente dopo circa 20 mesi dalla conversione, sono rilevabili alcune sostanziali modifiche nei valori degli indici morfometrici relativi agli strati superficiali delle aree di studio ubicate all'interno dei confini del campo agrario lavorato secondo le tecniche di no-tillage. Queste modificazioni hanno permesso di fare alcune supposizioni relative alle probabili migliorie e ai possibili vantaggi che l'adozione dei sistemi di agricoltura conservativa può portare alla superficie agraria, attraverso una variazione dell'intensità dei fenomeni che caratterizzano l'erosione del suolo.

Inoltre, con il calcolo dei valori statistici (media, minimo, massimo, mediana, deviazione standard e indice di asimmetria) dei parametri morfometrici studiati per ognuna delle sei aree di studio, è stato dimostrato che le zone interessate da agricoltura conservativa possiedono una morfologia superficiale differente rispetto alle zone interessate da sistemi convenzionali, tale da ridurre presumibilmente l'erosione del suolo e la creazione dei fenomeni di runoff.

Infatti, dopo aver calcolato gli indici morfometrici e i loro valori statistici per ognuna delle aree suddette, è emerso che, negli appezzamenti di terreno interessati da no-tillage, la pendenza media presenta dei valori che possiedono un valore medio e una deviazione standard maggiori rispetto

ai valori delle aree interessate da tecniche convenzionali, pertanto sono distribuiti in maniera più ampia e con valori più grandi rispetto a questi ultimi.

La curvatura media, calcolata con differenti misure della finestra mobile e relativa alle aree di studio interessate da tecniche conservative, è caratterizzata da un intervallo di valori più ampio in confronto alle aree trattate con sistemi tradizionali, dunque, ci si dovrebbe trovare in presenza di una superficie in cui i livelli di concavità e convessità sono più accentuati e alternati tra loro.

Il valore medio dell'indice di scabrezza superficiale è più elevato, perciò l'acqua piovana può presumibilmente essere meglio convogliata nelle numerose depressioni che si trovano nella superficie del campo interessato da semina su sodo.

Il calcolo dell'indice di connettività ha evidenziato che la direzione seguita da questo parametro è indirizzata verso più vie, perciò i sedimenti non dovrebbero fuoriuscire dalle aree di studio seguendo un'unica direzione. In questa circostanza, se si pensa al fatto che l'area di studio è solo una piccola porzione del campo agrario, allora si potrebbe affermare che, nelle aree di studio lavorate con metodi convenzionali, i sedimenti erosi seguono alcune direzioni principali e sono trasportati verso le parti esterne dell'appezzamento, perciò le particelle di suolo vengono perse.

Per quanto riguarda le direzioni di deflusso, è stato osservato che esse attraversano dei percorsi disposti in modo caotico, talvolta addirittura con verso opposto, quindi, la creazione di possibili fenomeni di ruscellamento superficiale dovrebbe essere sostanzialmente ridotta.

L'area drenata ha permesso di identificare le zone in cui si ha un'elevata probabilità che il flusso sia più intenso. La direzione seguita dai valori massimi di questo parametro segue quanto riportato nelle rappresentazioni grafiche delle direzioni del flusso e dell'indice di connettività, perciò, anche in questo caso, le aree drenate possiedono una multidirezionalità nelle zone interessate da no-tillage, mentre seguono una direzione principale nelle zone lavorate con metodi convenzionali.

Con l'analisi dettagliata di tutti questi parametri morfologici e dei rispettivi valori statistici, è stato possibile dichiarare che la tecnica SfM risulta essere una tecnica particolarmente efficace ed efficiente per l'effettuazione degli studi della morfologia superficiale presente nei terreni agricoli di una precisa zona, con una riduzione significativa dei costi e dei tempi necessari all'ottenimento dei risultati finali.

In futuro, serviranno ulteriori sperimentazioni per poter comprovare l'applicabilità di tale tecnica anche in altri contesti e in diversi territori poiché in questa tesi ci si è soffermati unicamente sull'analisi di aree totalmente pianeggianti e interessate da due soli sistemi di agricoltura tra loro molto differenti, senza tener conto di quelle che possono essere le problematiche inerenti alla diversa tessitura del terreno, all'aspetto topografico su larga scala, alle condizioni climatiche caratteristiche, alla vegetazione presente, alla storia geologica del territorio e altro ancora.

Nel prosieguo degli anni, questa tecnica fotogrammetrica potrà essere utilizzata anche dalle associazioni di agricoltori che operano nei diversi ambiti geografici per quantificare le migliorie apportate dalle tecniche di coltivazione conservativa in ogni singola azienda agraria, in quanto l'applicabilità e la sostenibilità economica di questo sistema d'agricoltura varia di molto a seconda delle caratteristiche topografiche presenti in ciascuna superficie agricola.

Usufruendo dei risultati delle analisi geomorfologiche e conoscendo la multifunzionalità associata al settore primario, si potrebbe utilizzare la tecnica fotogrammetrica SfM a elevata risoluzione per produrre, già a partire dai prossimi mesi, dei piani d'azione che prevedano l'utilizzo delle tecnologie di remote-sensing per analizzare le superfici agrarie nei vari territori e permettere lo studio dettagliato dei parametri morfometrici presenti in quel preciso luogo, al fine di ottenere dei dati utili agli enti e alle comunità di agricoltori per valutare se gli effetti derivanti dall'adozione delle tecniche conservative siano economicamente proponibili oppure no.

In questo modo, sarà possibile anche calcolare l'ammontare dei probabili incentivi economici che potranno essere assegnati agli agricoltori che sceglieranno di adottare le tecniche conservative in sostituzione di quelle convenzionali.

Inoltre, si potrà favorire la comunicazione interdisciplinare fra le varie istituzioni che operano nei vari territori per la salvaguardia del suolo, al fine di ottenere una mitigazione dei fenomeni di runoff, una diminuzione dei tassi relativi all'erosione dei terreni agricoli, un aumento della salubrità dell'ambiente e, cosa ancora più importante, un miglioramento delle condizioni di vita dell'intera società.

Bibliografia

- Agisoft LLC, 2012. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 0.9.0
- Agisoft PhotoScan versione 1.2.4. San Pietroburgo, Russia. Agisoft LLC, 2016. <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Aina P.O., 2011. Conservation tillage for sustainable agricultural productivity. Department of Soil Science and Land Resource Management, Faculty of Agriculture, Obafemi. Awolowo University, Ile-Ife, Nigeria
- Almagro M., de Vente J., Boix-Fayos C., García-Franco N., Melgares de Aguilar J., González D., Solé-Benet A. e Martínez-Mena M., 2013. Sustainable land management practices as providers of several ecosystem services under rainfed Mediterranean agroecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*
- Anonymous, 1999. Water Pollution Incidents in England and Wales 1998. A report by the Environment Agency. The Stationary Office, Londra, Inghilterra
- ArcMap versione 10.3.1. California, USA. Environmental Systems Research Institute, 2015. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop>
- Arden-Clarke C. e Hodges R.D., 1987. The environmental effects of conventional and organic biological farming systems. Soil erosion with special reference to Britain. *Biological Agriculture and Horticulture Journal* 4: 309-357
- ARPAV, 2012. Il Suolo – formazione, proprietà, funzioni. <http://www.arpa.veneto.it/>
- ARPAV, 2016a. Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. Principali variabili meteorologiche. Anni 1994-2015. <http://www.arpa.veneto.it/dati-ambientali/open-data/clima/principali-variabili-meteorologiche>
- ARPAV, 2016b. Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. Dati meteorologici ultimi anni. http://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico/Mappa_2015_VVENTO.htm?t=RG
- Baker C.J., Saxton K.E. e Ritchie W.R., 2002. No-tillage seeding: science and practice. Centre for Agriculture and Bioscience International, Oxford, Inghilterra
- Baker J.L. e Laflen J.M., 1983. Effect of tillage systems on runoff losses of pesticides, a rainfall simulation study. *Journal of Soil and Water Conservation* 38: 186-193
- Ballaré C.L., Scopel A.L., Sánchez R.A. e Radosevich S.R., 1992. Photomorphogenic processes in the agricultural environment. *Photochemistry Photobiology* 56: 777–788
- Benvenuti S. e Macchia M., 1993. Calculation of threshold temperature for the development of various weeds. *Agricoltura Mediterranea* 123: 252–256
- Blevins R.L., Smith M.S., Thomas G.W. e Frye W.W., 1983. Influence of conservation tillage on soil properties. Agricultural Experiment Station, University of Kentucky. Paper n. 83-3-40. Kentucky, USA
- Bollettin A., 2016. Using Structure from Motion photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning to estimate blockage factor of vegetation in open channels.

- Bono A., 2012. Parametri chimici e biologici in suoli gestiti con tecniche di agricoltura conservativa (PSR Veneto Misura 214i). Relatore Carletti P., Correlatore Nardi S., Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro (PD)
- Borselli L., Cassi P. e Torri D., 2008. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena* 75: 268-277
- Bot A. e Benites J., 2005. The importance of soil organic matter. FAO, Roma, Italia
- Brooks P.C., Cayuela M.L., Contin M., Nobili De M., Kemmitt S.J., e Mondini C., 2008. The mineralization of fresh and humified soil organic matter by soil microbial biomass. *Waste Management* 28: 716-722
- Bullied W.J., Van Acker R.C. e Bullock P.R., 2012. Review: Microsite characteristics influencing weed seedling recruitment and implications for recruitment modeling. *Canadian Journal of Plant Science* 92: 627-650
- Carter M.R. e Steed G.R., 1992. The effects of direct-drilling and stubble retention on hydraulic-properties at the surface of duplex soils in North-Eastern Victoria. *Australian Journal of Soil Research* 30: 505-516
- Carturan L., Baroni C., Becker M., Bellin A., Cainelli O., Carton A. e Salvatore M.C., 2013. Decay of a long-term monitored glacier: Careser glacier (Ortles-Cevedale, European Alps). *The Cryosphere* 7: 1819-1838
- Cavalli M., Tarolli P., Marchi L. e Dalla Fontana G., 2008. The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *Catena* 73: 249-260
- Cavalli M., Trevisani S., Comiti F. e Marchi L., 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. Sediment sources, source-to-sink fluxes and sedimentary budgets. *Geomorphology* 188: 31-41
- Cerdà A. e Doerr S.H., 2008. The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena* 74: 256-263
- Chang T.F.M., Piccinini L.C. e Iseppi L., 2005. La remunerazione delle risorse naturali: buco nero della scienza economica. *Agribusiness Paesaggio e Ambiente* 7 (3)
- Chan Y.C., Chen Y.G., Shih T.Y. e Huang C., 2007. Characterizing the Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: detailed geomorphic features and their structural implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 31: 303-316
- CHARTAGENA (2011) Chartagena: fotografia e analisi aerea territorio <http://chartagena.blogspot.it/>
- Ciccarese D., 2012. Il libro nero dell'agricoltura. Milano: Ponte alle Grazie
- CloudCompare versione 2.7.0. Parigi, Francia. CloudCompare, 3D point cloud and mesh processing software. Electricite De France Research & Development, 2016. <http://www.danielgm.net/cc/>
- Commissione UE, 2010. La PAC verso il 2020: rispondere alle future sfide dell'alimentazione, delle risorse naturali e del territorio", Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo,

al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni. Bruxelles, Belgio

-Conselvan G.B., 2013 Suoli sottoposti a tecniche di agricoltura conservativa: studio dei parametri chimico-biologici. Relatore Carletti P., Correlatore Nardi S., Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro (PD)

-Costa-Cabral M. e Burges S. J., 1994. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, *Water Resources Research* 30 (6): 1681-1692

-Crema S., Schenato L., Goldin B., Marchi L. e Cavalli M., 2015. Toward the development of a stand-alone application for the assessment of sediment connectivity. *Rendiconti online della Società Geologica Italiana* 34: 58–61

-Croke J., Mockler S., Fogarty P. e Takken J., 2005. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology* 68: 257-268

-CTIC, 2004. Conservation Technology Information Center. Conventional Tillage. <http://www.ctic.purdue.edu/>

-Davidson A., Bruneau P.M.C., Grieve I.C. e Young I.M., 2002. Impacts of fauna on an upland grassland soil as determined by micromorphological analysis. *Applied Soil Ecology Journal* 20: 133–143

-De Nobili M. e Maggioni A., 1993a. Influenza della sostanza organica sulle proprietà fisiche del suolo. In Nannipieri P. (Ed.), *Ciclo della sostanza organica nel suolo*. Bologna: Patron, 43-54

-De Nobili M. e Maggioni A., 1993b. Regolazione delle proprietà chimiche del suolo da parte della sostanza organica. In Nannipieri P. (Ed.), *Ciclo della sostanza organica nel suolo*. Bologna: Patron, 55-65

-De Ploey J.A., Imeson A., Oldeman L.R., 1991. Soil erosion, soil degradation and climate change. In Brower F.M., Thomas A.J. e Chadwick M.J. (Eds.), *Land Use Change in Europe*. Kluwer Academic Publishers, 59-71. Londra, Inghilterra

-Deen W. e Katakis P.K., 2003. Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. Department of Plant Agriculture, University of Guelph. Guelph, Canada

-DeKoff J.P., Moore Jr. P.A., Formica S.J., VanEps M. e DeLaune P.B., 2011. Effects of pasture renovation on hydrology, nutrient runoff, and forage yield. *Journal of Environmental Quality* 40: 320–328

-Dell’Agnola G. e Nardi S., 1993. Ruolo della sostanza organica nella regolazione della fertilità dei terreni. In Nannipieri P. (Ed.), *Ciclo della sostanza organica nel suolo*. Bologna: Patron, 41

-Dendooven L., Gutierrez-Oliva V.F., Patino-Zuniga L., Ramirez-Villanueva D.A., Verhulst N., Luna-Guido M., Marsch R., Montes-Molina J., Gutierrez-Miceli F.A. e Vasquez-Murrieta S., 2012. Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Science of the Total Environment Journal* 431: 237-244

- Derpsch R. e Theodor F., 2008. Global overview of conservation agriculture adoption. In FAO (Ed.)
- Derpsch R., 2005. The extend of Conservation Agriculture adoption worldwide: Implications and impact. In Proceedings of the Third World Congress on Conservation Agriculture: Linking Production, Livelihoods and Conservation, 3-7 Ottobre, Nairobi, Kenya
- Don C. Reicosky, 2015. Conservation tillage is not conservation agriculture. Journal of Soil and Water Conservation 70 (5): 103A-108A
- During R.A. e Hummel H.E., 1997. Glyphosate: importance in no-till agriculture with regard to environmental side-effects. In Tebrugge F. e Bohrnsen A. (Eds.), Experiences with the Applicability of No-tillage Crop Production in the West-European Countries. In Proceedings of the 3rd European Commission Workshop, 69–78. Giessen, Germania
- ECAAF, 2001. European Conservation Agriculture Federation. <http://www.ecaf.org/>
- Esri, 2010. Understanding curvature rasters <https://blogs.esri.com/esri/arcgis/2010/10/27/understanding-curvature-rasters/>
- Esri, 2016. ArcGIS for Desktop. ArcMap. Tools. California, USA. <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools>
- Eurostat, 2013. Agro-environmental indicator-tillage practices. http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Agri-environmental_indicator_-_tillage_practices
- Evans I.S., 1979. An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. University of Durham. Durham, Inghilterra
- Fairfield J. e Leymarie P., 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. Water Resources Research 27 (5): 709-717
- FAO, 2001. Food and Agriculture Organization. Summary, Conservation Agriculture, Matching Production with Sustainability. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>
- FAO, 2006. Food and Agriculture Organization. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports 103, Roma
- FAO, 2008. Food and Agriculture Organization. Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>
- FAO, 2012. Food and Agriculture Organization. Conservation Agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>
- FAO, 2013. Food and Agriculture Organization. Basic principles of conservation agriculture. <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>
- FAO, 2015. Food and Agriculture Organization. 2015 International Year of Soil. <http://www.fao.org/soils-2015>
- Fawcett R.S., Christensen B.R. e Tierney D.P., 1994. The impact of conservation tillage on pesticide runoff into surface water: a review and analysis. Journal of Soil and Water Conservation 49: 126-135

- Ferrerias L.A., Costa J.L., Garcia F.O. e Pecorari C., 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Tillage* 54: 31-39
- Fonstad M.A., Dietrich J.T., Courville B. C., Jensen J.L. e Carbonneau P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 421-430
- Franz H., 1949. *Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit*. Wien: Verlag Brilder Hollinek
- Gajda A.M., Przewloka B. e Gawryjolek K., 2013. Changes in soil quality associated with tillage system applied. *International Agrophysics Journal* 27 (2)
- Gajri P.R., Arora V.K. e Prihar S.S., 2002. *Tillage for sustainable cropping*. Food Products Press, New York, USA
- Gallant J.C. e Wilson J.P., 2000. Primary Topographic Attributes. In John Wiley & Sons (Eds.), *Terrain Analysis: Principles and Applications*. New York, USA
- Garcia A.L., Recasens J., Forcella F., Torra J. e Royo-Esnal A., 2013. Hydrothermal emergence model for Ripgut Brome (*Bromus diandrus*). *Weed Science* 61: 146-153
- Garcia-Torres L., Benites J., Martinez-Vilela A. e Holgado-Cabrera A., 2003. *Conservation agriculture: environment, farmers experience, innovations, socio-economy, policy*. Kluwer Academic Publisher, Boston, USA
- Gasparini V., 2014. Weeds in conservation agriculture. Biology, emergence dynamics and modelling to improve their control. Relatore Berti A., Correlatore Zanin G., Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro (PD)
- Gaynor J.D. e Findlay W.I., 1995. *Soil and Phosphorus Loss from Conservation and Conventional Tillage in Corn Production*. Harrow Research and Development Centre. Ontario, USA
- Gelmini Y., 2014. Analisi della USLE in contesto agricolo collinare su base LiDAR. Relatore Tarolli P., Dipartimento Territorio E Sistemi Agro-Forestali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova. Padova
- Giardini L., 1986. *Agronomia generale*. Bologna: Patron
- Giardini L., 2002. *Agronomia generale ambientale e aziendale*. Bologna: Patron
- Gilley J.E., 1995. Tillage effects on infiltration, surface storage and overland flow. In *Farming for a better Environment: a white paper*. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA
- Gomasasca M.A., 2004. *Elementi di geomatica*. Associazione Italiana di Telerilevamento, Milano
- Gomez C., Hayakawa Y. e Obanawa H., 2015. A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology. *Geomorphology* 242: 11-20
- Google Earth, 2016. Azienda Agraria Sperimentale Lucio Toniolo. <https://www.google.it/maps/place/Azienda+Agraria+Sperimentale+Lucio+Toniolo>

- Green S., Bevan A. e Shapland M., 2014. A comparative assessment of Structure from Motion methods for archaeological research. *Journal of Archaeological Science* 46: 173-181
- Gregorich E.G., Carter M.R., Angers D.A., Monreal C. e Ellert B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science* 74: 367-385
- Hamill A.S., 1997. Dandelion control in corn and soybean. In *Proceedings of the 1996 National Meeting, Expert Committee on Weeds*, 70-76. Victoria, Canada
- Harker K.N. e O'Donovan J.T., 2013. Recent weed control, weed management and Integrated Weed Management. *Weed Technology* 27: 1-11
- Horn B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Institute of Electrical and Electronic Engineers* 69: 14-47.
- Houghton R.A., 2003. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? *Global Change Biology* 9: 500-509.
- House G.J. e Parmelee R.W., 2005. Comparison of soil arthropods and earthworms from conventional and no-tillage agroecosystems. Department of Entomology, North Carolina State University e Institute of Ecology, University of Georgia. North Carolina e Georgia, USA
- Iseppi L., 2009. L'uso del suolo aziendale agricolo nei comuni italiani. Udine: Forum
- Jalonen J., Jarvela J., Virtanen J.P., Vaaja M. e Kurkela H., 2015. Determining Characteristic Vegetation Areas by Terrestrial Laser Scanning for Floodplain Flow Modeling. *Water* 7: 420-437
- James M.R. e Robson S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research* 117: 1-17
- Javernich L., Brasington J. e Caruso B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure from Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213: 166-182
- Jenny H., 1961. Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 25: 385-388
- Johnson K., Nissen E., Saripalli S., Arrowsmith J.R., McGarey P., Scharer K., Williams P. e Blisniuk K., 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion: *Geosphere* 10: 969-986
- Jones C.A., Bash G., Baylis A.D., Bazzoni D., Biggs J., Bradbury R.B., Chaney K., Deeks L.K., Held R., Gomez J.A., Jones R.J.A., Jordan V.W.L., Lane M.C.G., Leake A., Livermore M., Owens P.N., Ritz K., Sturny W.G. e Thomas E., 2006. Conservation Agriculture in Europe: an approach to sustainable crop production by protecting soil and water? SOWAP, Jealott's Hill, Bracknell, Inghilterra
- Kay B.D. e VandenBygaart A.J., 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 66 (2): 107-118
- Kern J.S. e Johnson M.G., 1993. Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. ManTech Environmental Technology, USEPA Environmental Research Laboratory. Oregon, USA

- Kern K.S. e Johnson M.G., 1993. Conservation tillage impacts national soil and atmospheric carbon levels, *Soil Science Society of America Journal* 57, 200-210
- Kirkby M.J., Jones R.J.A., Irvine B., Gobin A., Govers G., Cerdan O., Van Rompaey A.J.J., Le Bissonnats Y., Daroussin J., Boer M., Kosmas C., Yassoglou N., Tsara M., Mantel S. e Van Linden G., 2004. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, version 1 October 2003. Explanation of Special Publication ISPRA 2004 N.73. European Soil Bureau Research Report N.16. Office for Official Publications of the European Communities, Lussemburgo
- Kiss T. e Benyhe B., 2014. Micro-topographical surface alteration caused by tillage and irrigation canal maintenance and its consequences on excess water development. *Soil and Tillage Research* 148: 106-118
- Kladivko E.J., Griffith D.R. e Mannering J.V., 2003. Conservation tillage effects on soil properties and yield of corn and soya beans in Indiana. Department of Agronomy, Journal of the Purdue University. Paper n.10,296. Indiana, USA
- Koutsoudis A., Vidmar B., Ioannakis G., Arnaoutoglou F., Pavlidis G., Chamzas C., 2014. Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage* 15: 73-79
- Kurothe R.S., Kumar G., Singh R., Singh H.B., Tiwari S.P., Vishwakarma A.K., Sena D.R. e Pande V.C., 2014. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India. *Soil and Tillage Research* 140: 126-134
- Lahamar R., 2010. Adoption of conservation agriculture in Europe. Lessons of the KASSA project. *Land Use Policy* 27: 4-10
- Lal R., 1998. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. School of Natural Resources, Ohio State University. Ohio, USA
- Lal R., 2000. Soil management in the developing countries. *Journal of Soil Science* 165: 191-207
- LandSerf versione 2.3. Londra, Inghilterra. Wood J., 2004. <http://www.landserf.org/>
- Lavelle P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. In Begon M. (Ed.), *Advances in Ecological Research*. Academic Press, New York, USA, 93-132
- Lea N. L., 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm. *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*. New York: Chapman & Hall
- Lo Brutto M., 2005. I sistemi Laser Scanning aerei. *Geomatica e modellizzazione digitale del terreno, Sistemi Informativi Territoriali*, Università degli Studi di Palermo. Palermo
- Lopez M.V., Arrue J.L. e Sanchez-Giron V., 1999. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragón. Crèteil, Francia
- Lowe D. G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *International Conference on Computer Vision*. Corfù, Grecia. 1150-1157

- Lowe D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision* 60 (2): 91-110
- Ludwig B., Boiffin J., Chadeeuf J. e Auzet A.V., 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* 25: 227–252
- Mannering J.V. e Fenster C.R., 1983. What is conservation tillage? *Journal of Soil and Water Conservation* 38 (3): 140-143
- Marandola D., 2010. Conservation Agriculture in southern Italy: the AIPAS association and the “farm- research-school” network. In *Proceedings of the European Congress on Conservation Agriculture*, 533-544
- Marchi L. e Dalla Fontana G., 2005. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basin. *Environmental Geology* 48: 218-228
- Marinello F., Pezzuolo A., Gasparini F., Arvidsson J. e Sartori L., 2015. Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization. *Precision Agriculture* 16: 601-612
- Masin R., Loddo D., Benvenuti S., Otto S. e Zanin G., 2012. Modeling weed emergence in Italian maize field. *Weed Science* 60: 254-259
- MathWorks, 2016. Il linguaggio del calcolo tecnico. Mathworks. MATLAB. https://it.mathworks.com/products/matlab/?s_tid=hp_ff_p_matlab
- Mazzon L., 2016, Comunicazione personale
- Micheletti N., Chandler J. H. e Lane S. N., 2015. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques*. British Society for Geomorphology
- Mikkola H.J., Alakukku L., Kankanen H., Jalli H., Lindroos M., Huusela-Veistola E., Nuutinen V., Latti M., Puustinen M., Turtola E., Mylly M. e Regina K., 2005. Direct drilling in Finland, a review. In *Proceedings 4th International Scientific and Practical Conference, Ecology and Agricultural Machinery*, 25–26 Maggio. San Pietroburgo, Russia
- Monai M., Racca R., Barbi A. e Rech F., 2003. ARPAV Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. I fattori di rischio climatico e le azioni di supporto meteorologico alle attività di protezione civile nella Provincia di Venezia. Teolo
- Moore I. D., Grayson R. B. e Landson A. R., 1991. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5: 3-30
- Moorthy I., Miller J.R., Berni J.A., Zarco-Tejada P., Hu B. e Chen J., 2011. Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 204-214
- Montgomery D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 13268-13272
- Nandula V.K., Eubank T., Poston D.H., Koger C.H. e Reddy K.N., 2006. Factors affecting germination of horseweed (*Conyza canadensis*). *Weed Science* 54: 898-902
- Nannipieri P., 1993. *Ciclo della sostanza organica nel suolo: aspetti agronomici, chimici, ecologici e selvicolturali*. Bologna: Patron

- Nomisma, 2005. 10° Rapporto Agricoltura. La politica agricola europea nell'UE allargata. Milano: Agra
- O'Callaghan J. F. e Mark D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing* 28: 328-344
- Ogden C.B., Van Es H.M., Wagenet R.J. e Steenhuis T.S., 1999. Spatial-temporal variability of preferential flow in a clay soil under no-till and plow-till. *Journal of Environmental Quality* 28: 1264-1273
- Omasa K., Hosoi F. e Konishi A., 2007. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure. *Journal of Experimental Botany* 58: 881-898
- Organic Soil Technology, 2013. Ecological Agricultural Technologies. <http://www.organicsoiltechnology.com/>
- Osborn T.J., Hulme M., Jones P.D. e Basnett T.A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology* 20: 347-364
- Ouèdraogo M.M., Degrè A., Debouche C. e Lisein J., 2014. The evaluation of unmanned aerial system-based photogrammetry and terrestrial laser scanning to generate DEMs of agricultural watersheds. *Geomorphology* 214: 339-355
- Pareja M.R., Staniforth D.H. e Pareja G.P., 1985. Distribution of weed seed among soil structural units. *Weed Science* 33: 182-189
- Park H., Lee H., Adeli H. e Lee I., 2007. A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 22: 19-30
- Paul B.K., Vanlauwe B., Ayuke F., Gassner A., Hoogmoed M., Hurisso T.T., Koala S., Lelei D., Ndabamenye T., Six J., Pulleman M.M., 2013. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment Journal* 164: 14-22
- Pirotti F. e Tarolli P., 2010. Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction. *Hydrological Processes* 24: 1187-1197
- Pisante M., 2007. *Agricoltura Blu: la via italiana dell'agricoltura conservativa. Principi, tecnologie e metodi per una produzione sostenibile* a cura di Michele Pisante, Bologna: Edagricole
- Pisante M., 2013. *Agricoltura sostenibile. Principi, sistemi e tecnologie applicate all'agricoltura produttiva per la salvaguardia dell'ambiente e la tutela climatica*. Bologna: Edagricole
- Potter T.L., Bosch D.D. e Strickland T.C., 2015. Tillage impact on herbicide loss by surface runoff and lateral subsurface flow. *Science of the Total Environment* 530: 357-366
- Prosdocimi M., Calligaro S., Sofia G., Dalla Fontana G. e Tarolli P., 2015. Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40: 1891-1906
- Prosdocimi M., Tarolli P. e Cerdà A., 2016. Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. *Earth Science Reviews* 161: 191-203
- Puskas I., Gal N. e Farsang A., 2012. Impact of weather extremities (excess water, drought) caused by climate change on soils in Hungarian Great Plain. In Rakonczai J. e Ladanyi Z. (Eds.),

- Review of Climate Change Research Program at the University of Szeged, 73–88. Seghedino, Ungheria
- Quinton J.N., Govers G., Van Oost K. e Bardgett R.D., 2010. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Natural Geoscience* 3: 311-313
- Reicosky D.C. e Archer D.W., 2007. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil Tillage Research* 94: 109-121
- Roberts H.A. e Potter M.E., 1985. Emergence patterns of weed seedling in relation to cultivation and rainfall. *Weed Research* 30: 377-382
- Roering J. J., Mackey B. H., Marshall J. A., Sweeney K. E., Deligne N. I., Booth A. M. e Cerovski-Darriau C., 2013. Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork. *Geomorphology* 200: 172-183
- Roncella R., Re C. e Forlani G., 2011. Performance evaluation of a structure and motion strategy in architecture and cultural heritage. *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38: 5-16
- Rosa F., 2000. Sviluppo urbano e domanda di amenità ambientali. In *La fruizione del paesaggio*. Udine: Forum
- Rusco E., Jones R.J. e Bidoglio G., 2001. Organic matter in soil of Europe: present status and future trends. Office for Official Publication of the European communities, Lussemburgo
- Sadeghi A.M. e Isensee A.R., 1997. Alachlor and cyanazine persistence in soil under different tillage and rainfall regimes. *Journal of Soil Science* 162: 430-438
- SendInConnect versione 2.3. Cavalli M. e Trevisani S., 2016. https://github.com/HydrogeomorphologyTools/SedInConnect_2.3/releases
- Seta A.K., Blevins R.L., Frye W.W. e Barfield B.J., 1993. Reducing Soil Erosion and Agricultural Chemical Losses with Conservation Tillage. Department of Agronomy, University of Kentucky. Paper n. 92-3-154. Kentucky, USA
- Shervais K., 2016. Structure from Motion Guide for Instructors and Investigators. UNAVCO
- Sibson R., 1981. A brief description of natural neighbor interpolation. In John Wiley & Sons (Eds.), *Interpreting Multivariate Data*, Barnett 5: 21–36. Chichester, Inghilterra
- Six J., Elliott E.T., Paustian K. e Doran J.W., 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal* 62: 1367–1377
- Skoien S., 1988. Soil erosion and runoff losses of phosphorous. Effects of tillage and plant cover. *Norsk-Landbruksforskning* 2: 207-218
- Smith D.R., Owens P.R., Leytem A.B. e Warnemuende E.A., 2007. Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event. *Environmental Pollution Journal* 147: 131–137
- Smith P., Powlson D.S., Glending M.J. e Smith J.U., 1998. Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology* 4: 679-685

- Snively N., Seitz S. N. e Szeliski R., 2008. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80: 189-210
- Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F. e Roger-Estrade J., 2011. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118: 66-87
- Soil Science Glossary Terms Committee, 2008. Glossary of soil science terms. Soil Science Society of America. Wisconsin, USA
- Sofia G., Dalla Fontana G. e Tarolli P., (2014). High-resolution topography and anthropogenic feature extraction: testing geomorphometric parameters in floodplains. *Hydrological Processes*, 2046-2061
- Sparling G.P., 1992. Ratio of microbial biomass to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research* 30: 195-207
- Spetsakis M. E. e Aloimonos Y., 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision* 6: 245-255
- Srivastava J.P., Tamboli P.M., English J.C., Lal R. e Stewart B.A., 1993. Conserving soil moisture and fertility in the warm seasonally dry tropics. World Bank Technical Paper n.221. The World Bank, Washington DC, USA.
- SSSA, 1997. Soil Science Society of America. <https://www.soils.org/>
- Stagnari F., Ramazzotti S. e Pisante M., 2010. Conservation agriculture: a different approach for crop production through sustainable soil and water management: a review. In: *Organic farming, pest control and remediation of soil pollutants*, 55-83. Berlino, Germania: Springer
- Stehouwer R.C., Dick W.A. e Traina S.J., 1994. Sorption and retention of herbicides in vertically orientated earthworm and artificial burrows. *Journal of Environmental Quality* 23: 286-292
- Stevenson F.J., 1982. *Humus Chemistry, genesis, composition and reactions*. John Wiley and Sons, New York, USA
- Stewart B.A., 2007. Water conservation and water use efficiency in dry lands. In *Proceedings of international Workshop on Conservation Agriculture for Sustainable Land management to improve the Livelihood of people in Dry areas*. Damasco, Siria, 57-66
- Straatsma M., Warmink J. e Middelkoop H., 2008. Two novel methods for field measurements of hydrodynamic density of floodplain vegetation using terrestrial laser scanning and digital parallel photography. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1595-1617
- Sun Y., Zeng Y., Shi Q., Pan X. e Huang S., 2015. No-tillage controls on runoff: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 153: 1-6
- Swanton C.J. e Murphy S.D., 1996. Weed science beyond the weeds: the role of integrated weed management (IWM) in agroecosystem health. *Weed Science* 44: 437-445
- Swanton C.J., Shrestha A., Roy C.R., Ball-Coelho B.R. e Knezevic S.Z., 1999. Effect of tillage systems, N, and cover crop on the composition of weed flora. *Weed Science* 47: 454-461

- Szatmari J., Szijj N., Mucsi L., Tobak Z., van Leeuwen B., Lévai C. e Dolleschall J., 2011. Spatial data collection to support the mapping and modelling of excess water development. In Loki J. (Ed.), *Theory and Practice of GIS II*, 27–34. Debrecen, Ungheria
- Tabaglio V., Gavazzi C. e Menta C., 2008. The Influence of No-Till, Conventional Tillage and Nitrogen Fertilization on Physico-Chemical and Biological Indicators After Three Years of Monoculture Barley. *Italian Journal of Agronomy* 3: 233-240
- Talarico R., 2009. Tecnologie meccaniche adoperate in Agricoltura Conservativa per la protezione del suolo agrario dai fenomeni erosivi e dalla compattazione. Relatore Monarca D., Correlatore Santoro G., Dipartimento di Geologia e Ingegneria meccanica, idraulica e naturalistica per il territorio, Facoltà di Agraria, Università degli Studi della Tuscia di Viterbo. Viterbo
- Tarboton D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33 (2): 309-319
- Tarolli P., Arrowsmith J. R. e Vivoni E. R., 2009. Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. *Geomorphology* 113: 1-3
- Tarolli P., 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216: 295–312
- Tarolli P. e Sofia G., 2016. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology* 255: 140-161
- TauDEM versione 5.3.5. Utah, USA. Tarboton D., 2016. <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>
- Tebrugge F., 2001. No-tillage visions - protection of soil, water and climate and influence on management and farm income. In Garcia-Torres L., Benites J. e Martinez-Vilela A. (Eds.), *Conservation Agriculture - A Worldwide Challenge*. World Congress on Conservation Agriculture 1: 303–316
- Tonelli C., Veronesi U. e Casadei E., 2010. *Acqua e cibo: la rivoluzione necessaria. I piani della scienza per nutrire il pianeta*. Milano: Sperling & Kupfer
- Tonin A., 2012. Studio dei parametri biologici in suoli sottoposti a tecniche di agricoltura conservativa e copertura continuativa. Relatore Carletti P., Correlatore Nardi S., Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro (PD)
- Tonkin T.N., Midgley N.G., Graham D.J. e Labadz J.C., 2014. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: a test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. *Geomorphology* 226: 35-43.
- Torrensen K.S., Skuterud R., 2002. Plant protection in spring cereal production with reduced tillage. Changes in weed flora and weed seedbank. *Crop Protection Journal* 21: 179-193
- Toth C. e Szabo G., 2005. Survey of mounds and tells in Hungary. In: Dobos A. e Ilyes Z. (Eds.), *Protection of Geological and Geomorphological Features*, 111–125. Eger, Ungheria
- Treccani, 2013. *Agricoltura*. <http://www.treccani.it/enciclopedia/agricoltura/>

- Troeh F.R. e Thompson L.M., 1993. *Soils and Soil Fertility*. Oxford University Press, New York, USA
- Turbé A., De Toni A., Benito P., Lavelle P., Ruiz N., Van der Putten W.H., Labouze E. e Mudgal S., 2010. *Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers*. Bio Intelligence Service, Report for European Commission, Environment Directorate-General. Bruxelles, Belgio
- Unger P.W., Stewart B.A., Parr J.F. e Singh R.P., 1991. Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semi-arid regions. *Soil and Tillage Research* 20 (2-4): 219-240
- Università degli Studi di Padova, 2016. Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria. Campus. <http://www.agrariamedicinaveterinaria.unipd.it/strutture-1/campus>
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A. e Montanarella L., 2000. *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau, Joint Research Center of the European Commission. Bruxelles, Belgio
- Violante P., 2002. *Chimica del suolo e della nutrizione delle piante*. Bologna: Edagricole, 337
- Wang J., Lu G., Guo X., Wang Y., Ding S. e Wand D., 2014. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems Journal* 101: 93-106
- West T.O. e Marland G., 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment Journal* 91: 217-232
- Westoby M. J., Brasington J., Glasser N. F., Hambrey M. J. e Reynolds J. M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179: 300-314
- Westoby M. J., Dunning S. A., Woodward J., Hein A. S., Marrero S. M., Winter K. e Sugden D. E., 2015. Sedimentological characterization of Antarctic moraines using UAVs and Structure-from-Motion photogrammetry. *Journal of Glaciology* 61 (230): 1088-1102
- Winter S.R. e Unger P.W., 2001. Irrigated wheat grazing and tillage effects on subsequent dryland grain sorghum production. *Agronomy Journal* 93: 504–510
- Wood J. D., 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. University of Leicester. Leicester, Inghilterra
- Wuest S.B., 2001. Earthworm, infiltration and tillage relationships in a dryland pea-wheat rotation. *Applied Soil Ecology Journal* 18: 187-192
- Youlton C., Wendland E., Anache J.A.A., Poblete-Echeverria C. e Dabney S., 2016. Changes in Erosion and Runoff due to Replacement of Pasture Land with Sugarcane Crops. *Sustainability* 8 (685): 1-12
- Zanin G., 2016. Università degli Studi di Padova. Azienda Agraria Sperimentale “Lucio Toniolo”. <http://www.unipd.it/esterni/wwwazagr/>
- Zdruli P., Jones R. J. A. e Montanarella L. 2004. *Organic Matter in the soils of Southern Europe*. European Soil Bureau Technical Report. Office for Official Publication of the European Communities, Lussemburgo