

The image shows a vast field of green cover crops, likely a legume, used for soil enrichment. The field is divided into rows, and the plants are in various stages of growth. In the background, there are trees and a utility pole under a clear sky. The image is framed by a large green diagonal shape that transitions into a geometric pattern of green triangles at the bottom right.

IMPIEGO DELLE COVER CROP NELLA COLTIVAZIONE DEL MAIS

A cura di: Daniele Cavalli, Martina Corti,
Giovanni Cabassi e Luca Bechini

IMPIEGO DELLE COVER CROP NELLA COLTIVAZIONE DEL MAIS

a cura di
Daniele Cavalli, Martina Corti,
Giovanni Cabassi, Luca Bechini



PSR LOMBARDIA
L'INNOVAZIONE
METTERE RADICI
2014 2020



Regione
Lombardia

Programma di Sviluppo Rurale 2014 - 2020

**Fondo Europeo Agricolo per lo Sviluppo Rurale:
l' Europa investe nelle zone rurali**

Pubblicazione realizzata con il cofinanziamento del FEASR
Responsabile dell'informazione: Fondazione Morando Bolognini
Autorità di Gestione del Programma: Regione Lombardia

IMPIEGO DELLE COVER CROP NELLA COLTIVAZIONE DEL MAIS

A cura di:

Daniele Cavalli, Martina Corti, Giovanni Cabassi, Luca Bechini

Autori:

Daniele Cavalli, Martina Corti, Mortadha Ben Hassine, Luca Bechini,
Pietro Marino Gallina, Domenico Ditto

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università degli Studi di Milano

Giovanni Cabassi, Nicolò Pricca, Dario Paolo, Lamberto Borrrelli
*Centro di ricerca zootecnia e acquacoltura di Lodi, Consiglio per la ricerca
in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria*

Luigi Degano, Fabio Introzzi, Roberto Fucella
Fondazione Morando Bolognini

Massimo Motti
Azienda agricola Motti

Lorenza Michelon, Daniele Della Torre, Stefano Toninelli, Alberto Merli
Condifesa Lombardia Nord-Est

Antonio Vigoni
Sport Turf Consulting - Milano

Dario Sacco
Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università degli Studi di Torino

Si ringraziano i seguenti studenti che svolgendo il tirocinio o la tesi nell'ambito del progetto CoCrop hanno contribuito alla sua realizzazione:
Riccardo Asti, Riccardo Beretta, Matteo Bosso, Federico Concas, Michele Croci,
Davide Mapelli, Diego Piccitto, Paolo Pozzi, Matteo Sala, Pietro Zarpellon,
Stefano Virgadola.

Il volume raccoglie i risultati delle ricerche svolte nell'ambito del progetto "Gestione agronomica e ambientale delle cover crop con particolare riguardo alle dinamiche dell'azoto" - CoCrop (CUP E86G16002800007) finanziato nell'ambito della Misura 16, Operazione 16.2.01, del PSR 2014-2020 della Regione Lombardia.

Responsabile scientifico: Pietro Marino Gallina

Progetto grafico e stampa: AGF S.p.A. Unipersonale
Sesto Ulteriano, San Giuliano Mil.

Stampato: 2019

IMPIEGO DELLE COVER CROP NELLA COLTIVAZIONE DEL MAIS

a cura di
Daniele Cavalli, Martina Corti,
Giovanni Cabassi, Luca Bechini



Indice

1 Introduzione alle cover crop	9
2 Obiettivi del progetto CoCrop	17
3 Rassegna bibliografica	19
4 Prove di campo	43
5 Telerilevamento aereo di cover crop	75
6 Stima del contenuto di azoto di cover crop tramite spettroscopia NIR	89
7 Strumento per la stima dell'azoto utile da cover crop	103
8 Costi e benefici delle cover crop	113
9 Bibliografia	119

Ricordo di Mauro Agosti

Mauro Agosti è stato uno dei promotori e degli estensori del progetto CoCrop, alla cui preparazione ha dato un contributo fondamentale. Purtroppo la sua prematura scomparsa, avvenuta il 20 gennaio 2017, ci ha impedito di lavorare con lui alla realizzazione del progetto.

Vogliamo ricordarlo qui, a beneficio di tutti coloro che l'hanno conosciuto, e presentarlo a chi non ha avuto questa fortuna.

Mauro Agosti era nato a Brescia l'8 marzo 1970. Fin da giovane aveva coltivato la sua passione per la natura e l'agricoltura diplomandosi a pieni voti presso l'Istituto Tecnico Agrario "Pastori" di Brescia. Aveva proseguito poi il suo percorso presso la Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Milano, dove si era laureato a pieni voti presentando una tesi sui Carabidi. Su questa famiglia di insetti aveva svolto numerosi studi e ricerche che lo avevano portato anche al ritrovamento di una nuova specie, a lui dedicata dopo la sua scomparsa (*Ocys agostii*).

Dopo gli studi e una breve esperienza presso la Coldiretti di Brescia, era stato assunto presso il Consorzio di Difesa di Brescia (oggi Condifesa Lombardia Nord-Est) dove aveva creato un Servizio Tecnico tuttora presente e attivo. Si è sempre occupato con grande professionalità della consulenza presso le aziende agricole associate seguendone le problematiche, in particolare per quanto riguarda gli aspetti agronomici e di difesa fitosanitaria, e accompagnandone alcune sulla strada dell'agricoltura conservativa. Competente e mai geloso delle sue conoscenze, amava condividere la sua esperienza non soltanto con gli agricoltori ma anche con colleghi, tecnici, agronomi e ricercatori. Questo lo aveva portato a creare una fitta rete di conoscenze e di scambi in Italia, Europa e anche negli Stati Uniti, con gli agricoltori dell'Indiana e con alcuni professori della Purdue University. Dopo aver conosciuto il Prof. Richard Edwards, instaurò con lui un'amicizia sincera. Il professore americano, tra i massimi esperti mondiali di Diabrotica del mais, aveva assecondato la sua curiosità accompagnandolo fino a diventare uno dei maggiori esperti di questa specie in Europa.

Grazie a lui il Condifesa ha potuto sviluppare un Servizio tecnico indipendente da qualsiasi logica commerciale, un team di lavoro volto ad attuare iniziative pionieristiche e attività stimolanti, origi-

nali, promuovendo un concetto di sperimentazione innovativa con prove in campo e in laboratorio per offrire agli agricoltori una risposta il più possibilmente oggettiva, con riscontri chiari e accessibili a tutti, all'interno di un'attività mai rivolta a fini commerciali, ma esclusivamente tecnico/scientifica, sicuramente unica e diversa da qualsiasi altro tipo di proposta.

Alla fine del 2015 Mauro aveva preso contatti con l'Università di Milano, cercando un rapporto di collaborazione che ben presto si era concretizzato proprio nella preparazione della proposta progettuale CoCrop. Il bando era stato pubblicato alla fine di dicembre e nei mesi successivi avevamo lavorato intensamente alla costruzione dell'idea progettuale e del partenariato. Mauro aveva contribuito con l'innovativa esperienza acquisita fino a quel momento dal Condifesa sulle cover crop e sull'agricoltura conservativa, aiutando quindi in modo determinante a focalizzare il progetto sugli aspetti ritenuti più importanti e realizzabili.

Le prime semine delle cover crop sono avvenute nel settembre 2017, troppo tardi perché Mauro potesse assistervi e perché potesse poi vedere concluso il lavoro che voi gentili lettori avete tra le mani.





1 Introduzione alle cover crop

Le cover crop (colture di copertura) sono colture intercalari, ossia colture di breve durata con le quali si utilizza il terreno rimasto libero tra la fine di una coltura principale e l'inizio della successiva. Il loro carattere distintivo risiede nel fatto che non vengono attuate per ottenere una produzione utile bensì per conseguire benefici agronomici e ambientali; l'intera biomassa da loro prodotta non viene infatti asportata ma interrata (sovescio) oppure allettata e lasciata sulla superficie del suolo come pacciamatura.

Quando una cover crop viene attuata principalmente per assorbire nitrati e sottrarli così alla lisciviazione, viene indicata come catch crop (coltura trappola).

Fino alla fine degli anni sessanta le colture intercalari destinate alla raccolta, principalmente erbai composti con specie a rapida crescita, erano ampiamente praticate dato che gli animali erano presenti nella maggior parte delle aziende agricole e la loro alimentazione era basata su un ampio uso di foraggi freschi. Inoltre, erbai di leguminose da sovescio erano spesso coltivati per incrementare la disponibilità di azoto nel suolo. Successivamente, con la specializzazione degli indirizzi produttivi, l'avvento dell'alimentazione basata sugli insilati e la disponibilità di concimi azotati a basso prezzo, gli erbai hanno subito un inesorabile declino ed oggi in molti sistemi colturali il suolo rimane nudo nel periodo tra la fine di una coltura da reddito e l'inizio della successiva.

◀ *Cover crop al massimo del loro rigoglio vegetativo in prossimità dell'arresto della crescita. La semina è stata eseguita il 13 settembre 2017 e la foto è stata scattata il 17 novembre. Le cover crop in successione, dal primo piano verso l'orizzonte, sono: rafano "Tillage radish", avena strigosa, "Tillage radish", avena strigosa e senape bianca. L'ultima è una coltura da reddito (cima di rapa).*

1.1 Funzioni e benefici derivanti dalle cover crop

Coltivare una cover crop anziché lasciare il suolo nudo determina una sua protezione dall'azione battente della pioggia, un suo miglioramento strutturale legato alla crescita e alla penetrazione delle radici, lo sfruttamento della radiazione solare per produrre biomassa vegetale, l'assorbimento di elementi nutritivi disponibili nel suolo e di conseguenza la loro sottrazione alla lisciviazione e all'insolubilizzazione, la fissazione dell'azoto atmosferico (nel caso la cover crop sia una leguminosa), la limitazione dello sviluppo delle erbe infestanti e l'espressione di azioni allelopatiche.

Con la terminazione della cover crop la biomassa vegetale diventa substrato alimentare per la mesofauna, la microfauna ed i microrganismi del suolo dalla cui attività decompositiva derivano sostanze umiche, importantissime per il chimismo del suolo e per la formazione di aggregati stabili, ed elementi nutritivi in forma minerale disponibili per la coltura in successione.

I benefici che possono derivare dalla coltivazione delle cover crop sono quindi i seguenti:

- riduzione dell'inquinamento da nitrati delle acque di falda;
- riduzione dell'uso di concimi e fitofarmaci;
- conservazione del suolo (riduzione dell'erosione);
- riduzione del deflusso superficiale delle acque e del loro carico eutrofizzante di sostanza organica, azoto e fosforo verso i fiumi, i laghi ed il mare;
- riduzione delle perdite di produzione legate al ristagno idrico, all'erosione e alla formazione di croste superficiali;
- riduzione del bisogno di lavorazione del suolo, data la migliore struttura;
- maggiore efficienza d'uso dell'acqua quando le cover crop vengono allettate e lasciate sulla superficie del suolo.

1.2 Periodi di coltivazione delle cover crop e specie utili

In funzione delle colture principali poste in successione, i periodi utili per la coltivazione delle cover crop si collocano in diversi momenti dell'anno e possono avere una durata molto diversa. Ad esempio: nella successione mais-soia, il periodo utile si estende da

settembre ad aprile; nell'omosuccessione di frumento, da luglio ad ottobre; infine, nella successione frumento-mais, da luglio a marzo.

Nella scelta della cover crop devono essere valutati numerosi aspetti:

- **esigenze eco-fisiologiche** delle specie. Oltre alla compatibilità con il tipo di suolo e la precessione colturale, è particolarmente considerata la capacità di germinare e crescere nelle condizioni termiche e di disponibilità idrica del periodo di coltivazione, considerando minimo o assente l'apporto idrico con l'irrigazione. Specie adatte al periodo estivo sono, ad esempio, il sorgo sudanese, il miglio, il panico e la vigna, mentre l'avena, la segale, la veccia, la senape ed i rafani sono adatti al periodo autunnale;
- **gelività**, ossia la suscettibilità della cover crop a morire per freddo o congelamento nel corso dell'inverno. Essa comporta la terminazione naturale della cover crop senza che sia necessario eseguire appositi interventi chimici o meccanici. Specie gelive interessanti, nel contesto climatico della pianura lombarda, sono l'avena strigosa, la senape bianca, il rafano "Tillage Radish" e la veccia del Bengala;
- **produttività**, la cui entità è il criterio di scelta prevalente quando si desidera incrementare il contenuto di sostanza organica dei suoli. La produttività è però vincolata dalla finestra temporale di coltivazione. Per massimizzare la produzione delle specie gelive, è fondamentale che la data di semina sia la più anticipata possibile. La senape bianca, l'avena bianca e l'avena strigosa sono tre specie gelive molto produttive. Nel caso delle specie ingelive è invece determinante il momento della terminazione: tanto più essa è tardiva, tanto maggiore potrà essere la produzione di biomassa. Specie capaci di esprimere una elevata produttività nel periodo di fine inverno-inizio primavera sono in generale le graminacee microterme (per esempio, segale, orzo, *Lolium* spp.), le brassicacee colza e ravizzone e la veccia villosa tra le leguminose;
- **capacità di fissare azoto atmosferico**, aspetto particolarmente rilevante per le aziende prive di bestiame e con orientamento verso la produzione biologica. In questi casi la scelta si indirizzerà verso le leguminose, come le vecce, i trifogli, il favino e la vigna;
- **capacità d'intercettare e assorbire nitrati**, importante quando il rischio che siano lisciviati nelle acque di falda è elevato, come nel caso delle aziende ad alto carico zootecnico e partico-

larmente nel periodo autunno-invernale. Per massimizzare tale funzione sono adatte le graminacee (*Lolium* spp., segale, avena) e le brassicacee (colza e senape bianca) in quanto specie nitrovoce e caratterizzate da elevato tasso di crescita nel periodo autunnale. Diversamente, sono poco idonee le leguminose;

- **azione strutturante sul terreno**, particolarmente richiesta quando le cover crop sono inserite in sistemi colturali con minima lavorazione e semina su sodo. Per strutturare lo strato superficiale del suolo sono efficaci tutte le graminacee foraggere ed i cereali autunno-vernini dato il loro denso apparato radicale fascicolato, mentre per decompattare il terreno più profondamente sono adatte specie con apparato radicale fittonante come le leguminose e le brassicacee (tra queste, in particolare il rafano Tillage radish);
- **capacità di contenere la flora infestante, i patogeni ed i parassiti**, quando si intende utilizzare un approccio integrato nel controllo delle avversità biotiche oppure si pratica l'agricoltura biologica. Il controllo della flora infestante durante la crescita delle cover crop avviene per competizione per la luce, l'acqua ed i nutrienti ed è legato in generale alla produttività della specie. A seguito dell'allettamento di una cover e della conseguente costituzione di uno strato pacciamante, il controllo è invece legato alla capacità di questo di estinguere la radiazione solare, di impedire meccanicamente l'emergenza delle plantule e di persistere. Inoltre può essere rilevante il rilascio di sostanze allelopatiche, come ad esempio i benzossazinoni rilasciati dalla segale. Per il controllo di diverse specie di nematodi possono essere utilizzate diverse varietà di rafano, che agiscono come colture trappola, e l'avena strigosa e la *Crotalaria juncea* che invece hanno proprietà nematocide. Infine, diverse brassicacee e sorghi possono essere utilizzati per la biofumigazione generando rispettivamente isotiocianato e acido cianidrico che hanno effetti anche su numerosi funghi patogeni.

1.3 Agrotecnica delle cover crop

La scelta della tecnica di coltivazione delle cover crop è in generale orientata alla minimizzazione dei costi dato che esse non producono un reddito diretto. Tuttavia è fondamentale che la cover crop riesca

ad insediarsi rapidamente e formare una copertura vegetale che soddisfi i requisiti minimi per raggiungere gli obiettivi per cui è stata adottata. Ciò implica, ad esempio, che in presenza di livelli carenti di elementi nutritivi nel suolo si proceda alla concimazione. Similmente occorre che si proceda all'irrigazione quando lo scarso contenuto idrico nel suolo dovesse prospettare l'appassimento irreversibile della coltura, particolarmente nella prima fase di crescita. Se non si adottano questi accorgimenti la coltivazione diventa antieconomica.

Normalmente, gli interventi previsti sono una leggera lavorazione del terreno, la semina e la terminazione. La necessità di eseguire quest'ultima viene meno quando si utilizzano specie gelive.

La semina può essere eseguita quando la coltura da reddito è ancora in atto, come nel caso della bulatura delle leguminose nei cereali autunno-vernini alla fine dell'inverno, oppure appena dopo la raccolta della coltura da reddito. In questo caso, essa può essere eseguita direttamente con una seminatrice da sodo oppure dopo una leggera lavorazione del suolo, nonché congiuntamente alla lavorazione utilizzando una macchina combinata che esegua lavorazione e semina. Nel caso in cui la raccolta di colture con elevato residuo colturale abbia prodotto andane può essere necessario un intervento con trinciastocchi per omogeneizzarne la distribuzione sul suolo ed evitare che durante la semina i semi vengano depositi nel residuo colturale anziché nel suolo.

La terminazione delle cover crop può essere eseguita chimicamente, principalmente con glifosate, oppure con mezzi meccanici circa 15 giorni prima dell'avvio della coltura da reddito. Nel caso in cui il consumo idrico della cover crop diventi critico per la disponibilità idrica per la coltura in successione oppure, in presenza di erbe infestanti, vi sia il rischio di una loro riproduzione, la terminazione può essere anticipata.

La terminazione meccanica può essere ottenuta con l'aratura e l'erpatura (con erpici a disco) producendo un completo o parziale interrimento della biomassa aerea, che sarà favorevole ad una rapida decomposizione ma per contro interromperà la copertura del suolo. Con la falciatura, la trinciatura e l'uso di scalzatori la biomassa aerea viene invece lasciata sulla superficie del suolo che pertanto continuerà ad essere protetto. La durata della protezione sarà più breve nel caso della trinciatura, data l'elevata lacerazione dei tessuti, e nel caso di biomasse poco lignificate. Sia con la trinciatura sia con



la sfalcatura possono verificarsi problemi di ricaccio. Quando, nei contesti di non lavorazione, si desidera costituire una pacciamatura con funzione di controllo delle erbe infestanti, la terminazione può, al meglio, essere eseguita con rulli allettatori (roller crimper). Questi, data la presenza di lame longitudinali sul rullo, allettano e lacerano i tessuti nei punti di contatto con le lame e dispongono la biomassa aerea delle cover crop sul suolo quasi come una stuoia. La semina può essere eseguita anche contestualmente alla rullatura utilizzando macchine combinate. Perché questa tecnica sia efficace, l'esecuzione deve essere attuata in prossimità della fioritura della cover crop, per minimizzarne il ricaccio, e la biomassa aerea delle cover crop deve essere abbondante (6-8 t sostanza secca ha⁻¹) e sufficientemente lignificata per resistere alla decomposizione fino alla completa copertura del suolo da parte della coltura da reddito.

1.4 Criticità delle cover crop

Rispetto ad una coltura da reddito, il raggiungimento dei risultati attesi dalla coltivazione di cover crop è più incerto. Questo si verifica sia perché nei periodi dedicati alla loro coltivazione i livelli termici, radiativi e/o la disponibilità idrica possono risultare anche marcatamente subottimali, sia perché, per motivi di sostenibilità economica, gli interventi agronomici devono essere minimizzati. Sebbene possano essere scelte specie e varietà rustiche, talvolta anche le cover crop possono subire danni rilevanti dovuti ad avversità biotiche.

Altre criticità sono rappresentate dalla possibilità che, in caso di insuccesso della terminazione, le cover crop si possano comportare come infestanti, dal fatto che semi duri di cover crop leguminose possano germinare nel corso della coltivazione della successiva coltura da reddito e dalla difficoltà d'incorporazione della biomassa aerea quando la cover crop è allo stadio maturo. Infine, alcune specie di cover crop possono fungere da ospiti alternativi di patogeni o parassiti di colture da reddito.

◀ *Stato di una cover crop costituita da due specie gelive, rafano "Tillage radish" e avena strigosa, alla fine dell'inverno. Foto scattata il 20 febbraio 2018 in uno dei campi dell'azienda "Agricola Motti" di Massimo Motti; la seconda azienda partner del progetto CoCrop.*



2 Obiettivi del progetto CoCrop

Dati i numerosi benefici agro-ambientali legati all'adozione delle cover crop, di cui si è già riferito nel capitolo 1, nell'ambito del Programma di Sviluppo Rurale 2014-2020 di Regione Lombardia sono state istituite azioni d'incentivazione al loro uso nell'ambito dell'agricoltura integrata (Misura 10.1.01), della conservazione della biodiversità in risaia (Misura 10.1.03) e dell'agricoltura conservativa (Misura 10.1.04). Collateralmente, sono stati finanziati progetti di ricerca per approfondire le conoscenze circa le specie più idonee, le possibili tecniche colturali e la quantificazione dei benefici.

Il progetto "Gestione agronomica e ambientale delle cover crop con particolare riguardo alle dinamiche dell'azoto - CoCrop", finanziato nell'ambito della Misura 16.2.01 e di cui si riferiscono i principali risultati in questo volume, è stato focalizzato sull'impiego delle cover crop nell'ambito della maiscoltura condotta secondo tecniche di agricoltura conservativa.

La scelta di questa contestualizzazione deriva dal fatto che la transizione verso l'agricoltura conservativa rappresenta per la maiscoltura una reale opportunità per recuperare redditività e sostenibilità ambientale. Inoltre, è in questo contesto che si osserva il maggiore uso delle cover crop e si rileva maggiormente una richiesta di conoscenze. L'agricoltura conservativa si basa su tre pilastri: la riduzione delle lavorazioni del suolo, la copertura permanente di questo e l'avvicendamento colturale.

La riduzione delle lavorazioni consente una semplificazione del parco macchine, una riduzione dei consumi di carburante, una maggiore produttività del lavoro e, infine, una elevata tempestività

◀ *Campo sperimentale del progetto CoCrop realizzato a Sant'angelo Lodigiano presso la C.na Santa Martina della Fondazione Morando Bolognini. Foto del 2 novembre 2017.*

d'esecuzione dei lavori. Nel contempo il minore arieggiamento del suolo comporta un minor tasso di mineralizzazione della sostanza organica.

Il ricorso all'avvicendamento ed il mantenimento di una copertura permanente del suolo, sia tramite il non interrimento dei residui colturali sia attraverso la coltivazione di cover crop, sono poi favorevoli alla conservazione del suolo, al miglioramento della sua fertilità e ad una certa attenuazione delle avversità biotiche da cui può derivare una minore necessità d'impiego di fitofarmaci e concimi nella gestione delle colture da reddito.

Il progetto è stato impostato per approfondire le conoscenze su cinque specie di cover crop scelte tra quelle che nel corso di prove sperimentali condotte nel territorio bresciano da parte del CONDIFESA Lombardia Nord-Est (confronti in parcelloni senza repliche) avevano esibito una buona capacità d'insediarsi e realizzare una soddisfacente copertura del suolo senza creare problemi all'avvio della coltura da reddito successiva.

Di queste cover crop, nel progetto sono state misurate la produzione di biomassa, le asportazioni di azoto ed il contenimento delle erbe infestanti in relazione alla data di semina e al livello di disponibilità di azoto nel terreno in due diversi siti di pianura. Attraverso la misura della produzione e della concentrazione di azoto nella coltura di mais seguita alle cover crop è stato poi indagato il recupero colturale dell'azoto veicolato al suolo dalle cover crop dopo la loro terminazione.

Con tali misure si è inteso costituire una prima base di dati utile per razionalizzare sia la scelta e la gestione delle cover crop sia la gestione del mais in successione.

Inoltre, è stata esplorata sia la possibilità di produrre mappe di produzione e di asportazione di azoto delle cover crop tramite telerilevamento con sensori ottici portati da drone, sia la possibilità di determinare in campo, tramite spettroscopia NIR (nel vicino infrarosso), la concentrazione di azoto nelle cover crop. L'obiettivo del telerilevamento era quello di arrivare a introdurre la variabilità spaziale delle cover negli strati informativi utilizzati in agricoltura di precisione per la redazione dei piani di concimazione a dose variabile, mentre la misura rapida del contenuto di azoto delle cover crop era tesa a ridurre l'incertezza dei piani di concimazione derivante dall'utilizzo di valori compositivi tabellari nei calcoli.

3 Rassegna bibliografica

3.1 Introduzione e metodo di lavoro

Nella letteratura scientifica esistono moltissimi lavori sperimentali dedicati alle cover crop. Ad esempio, la ricerca dei termini "cover crop" oppure "catch crop" oppure "green manure" nel database bibliografico Scopus ha restituito (aprile 2019) quasi 10000 articoli scientifici. Per conoscere la sintesi dei risultati ottenuti in un numero così elevato di pubblicazioni abbiamo deciso di fare ricorso soprattutto ad articoli di review e di meta-analisi, che riassumono gli effetti delle cover crop misurati in numerosi lavori sperimentali (generalmente almeno alcune decine per ciascuna review o meta-analisi). Le review adottano un approccio "narrativo", mentre le meta-analisi producono sintesi quantitative degli effetti di singoli studi, ottenute attraverso un consolidato approccio statistico che prevede sempre il confronto tra un trattamento con cover crop e un controllo senza cover crop, mantenendo costanti tutti gli altri fattori ambientali (suolo, condizioni meteorologiche) e gestionali (es. rotazione, concimazioni, lavorazioni).

Inoltre, per tre specie (una per ciascuna importante famiglia botanica di cover crop: la senape bianca tra le brassicacee, la segale tra le graminacee e la veccia villosa tra le leguminose) abbiamo condotto un lavoro più di dettaglio, volto a sintetizzare i risultati sperimentali reperiti in letteratura per gli aspetti meno studiati nelle review e nelle meta-analisi. Tale approfondimento è stato così condotto:

- 1) Abbiamo identificato degli articoli scientifici disponibili in letteratura nei quali la specie è stata coltivata in pieno campo, utilizzandola come cover crop. Tra i lavori disponibili sono stati tratti solo quelli svolti in climi temperati (assimilabili quindi a quello lombardo).

2) Abbiamo estratto dalle figure e dalle tabelle degli articoli tutte le informazioni quantitative relative al sito e al disegno sperimentale, ai trattamenti effettuati, e alle variabili misurate sulle cover crop.

3) Abbiamo sintetizzato i dati raccolti, per descrivere la crescita nel tempo della biomassa della cover crop e il suo accumulo di azoto.

Questo capitolo presenta le evidenze più chiare emerse dall'analisi delle fonti bibliografiche appena descritte, in un ordine logico che prevede innanzitutto ciò che riguarda la crescita delle cover crop (temperature cardinali; accumulo di biomassa; asportazione di azoto), seguito dai loro effetti sulla coltura da reddito coltivata in successione (produzione e recupero di azoto), per finire con una parte relativa agli effetti agronomico-ambientali delle cover crop (perdite di azoto per lisciviazione, emissioni di N_2O , aumento della sostanza organica del terreno e controllo della flora infestante).

3.2 Temperature cardinali delle cover crop

Le temperature cardinali minime e massime rappresentano le temperature al di sotto e al di sopra delle quali una coltura non cresce e non si sviluppa. Le temperature cardinali ottimali sono quelle in corrispondenza delle quali si riscontra il massimo tasso di crescita o di sviluppo. Si tratta quindi di grandezze fondamentali per comprendere la possibilità di coltivare efficacemente una specie vegetale in un determinato ambiente.

Per consentire un confronto rigoroso di queste grandezze tra specie diverse di cover crop, abbiamo deciso di riferirci a un unico lavoro, quello di Tribouillois et al. (2016), che hanno condotto in laboratorio un esperimento di germinazione di semi di 36 specie di cover crop. Da questo abbiamo estratto i valori relativi alle specie studiate nell'ambito del progetto CoCrop.

Con riferimento alla temperatura ottimale, tra le leguminose quella del trifoglio alessandrino (*Trifolium alexandrinum*) è stata significativamente più alta ($30,0^{\circ}C$) rispetto a molte altre specie, come la *Vicia benghalensis* (veccia del Bengala; $23,6^{\circ}C$) e la *Vicia villosa* (veccia vellutata; $20,2^{\circ}C$); tra le graminacee spicca

quella della segale ($34,5^{\circ}\text{C}$), più alta rispetto ad avena strigosa ($27,8^{\circ}\text{C}$) e avena sativa ($25,5^{\circ}\text{C}$). La temperatura di base delle brassicacee ($5,4^{\circ}\text{C}$) è stata più alta di quella delle leguminose ($2,5^{\circ}\text{C}$); nell'ambito delle leguminose, quella del trifoglio alessandrino ($6,1^{\circ}\text{C}$) è stata più alta di quella delle due vecce ($2,1^{\circ}\text{C}$ per la veccia del Bengala e $1,4^{\circ}\text{C}$ per la veccia villosa); tra le graminacee si sottolinea la temperatura di base molto bassa per la segale ($0,6^{\circ}\text{C}$) e quella più alta dell'avena strigosa ($4,8^{\circ}\text{C}$); piuttosto bassa è stata anche la temperatura di base della senape bianca ($1,2^{\circ}\text{C}$).

3.3 Produttività e asportazione di azoto delle cover crop

La maggior parte degli effetti agronomici e ambientali delle cover crop dipendono da una loro rapida e abbondante crescita. Un grande accumulo di biomassa può infatti influenzare positivamente la riduzione della lisciviazione dei nitrati, il controllo delle malerbe, la riduzione dell'erosione, il miglioramento strutturale del suolo attraverso la restituzione non solo della biomassa aerea ma anche di quella radicale, l'aumento del contenuto di sostanza organica del terreno e l'aumento dell'efficienza d'uso dei nutrienti (attraverso la loro asportazione e messa a disposizione alla successiva coltura da reddito).

Nella loro review di 40 articoli che riportano i risultati sperimentali relativi a 50 specie di cover crop, Cherr et al. (2006) sottolineano la grande variabilità della produttività e dell'asportazione di azoto; essi ricordano anche che tale variabilità, oltre che alla specie, è dovuta all'ambiente (suolo e clima) e alla gestione agronomica. Tra i fattori climatici, le temperature influenzano la durata del periodo di crescita, mentre la disponibilità di acqua può limitare sia la velocità di germinazione ed emergenza (considerando che le semine avvengono di solito alla fine dell'estate) sia il successivo tasso di crescita. Thorup-Kristensen et al. (2003) indicano comunque che il principale fattore limitante all'asportazione di azoto da parte delle cover crop è la disponibilità dell'elemento nel terreno, e non la capacità delle piante di asportarlo, che è collegata al tasso di crescita, a sua volta strettamente dipendente da fattori meteorologici.

In ambienti temperati e con suoli a tessitura fine, Cherr et al. (2006) indicano che le cover crop leguminose non gelive possono accumulare consistenti quantità di biomassa (fino a 7-10 t ss ha⁻¹) e di azoto (150-250 kg N ha⁻¹); tra le non leguminose, essi riportano produzioni di biomassa di circa 2-4 t ss ha⁻¹ (60-80 kg N ha⁻¹) per l'avena sativa, e di 0,5-6 t ss ha⁻¹ per la segale (con asportazioni che non superano i 70 kg N ha⁻¹). Tali dati però non si riferiscono ad un consistente numero di articoli. Più consistente è la base di dati di Tonitto et al. (2006), che riportano per le leguminose asportazioni di azoto per ambienti temperati fino a 300 kg N ha⁻¹, con valori più frequenti nell'intervallo 100-200 kg N ha⁻¹; per le cover crop non leguminose essi riportano un valore medio di 37 kg N ha⁻¹, con il 50% degli studi che riportano asportazioni tra 20 e 60 kg N ha⁻¹. Le maggiori asportazioni delle cover crop leguminose sono generalmente spiegabili, in situazioni di non elevata disponibilità azotata, con la fissazione biologica dell'azoto compiuta dalle specie di questa famiglia; ciò significa anche che le cover crop leguminose sono in generale meno efficaci rispetto a graminacee e brassicacee nell'asportare l'azoto dal terreno.

I risultati del lavoro di sintesi da noi condotto per senape bianca è riportato nella **Figura 3.1**.

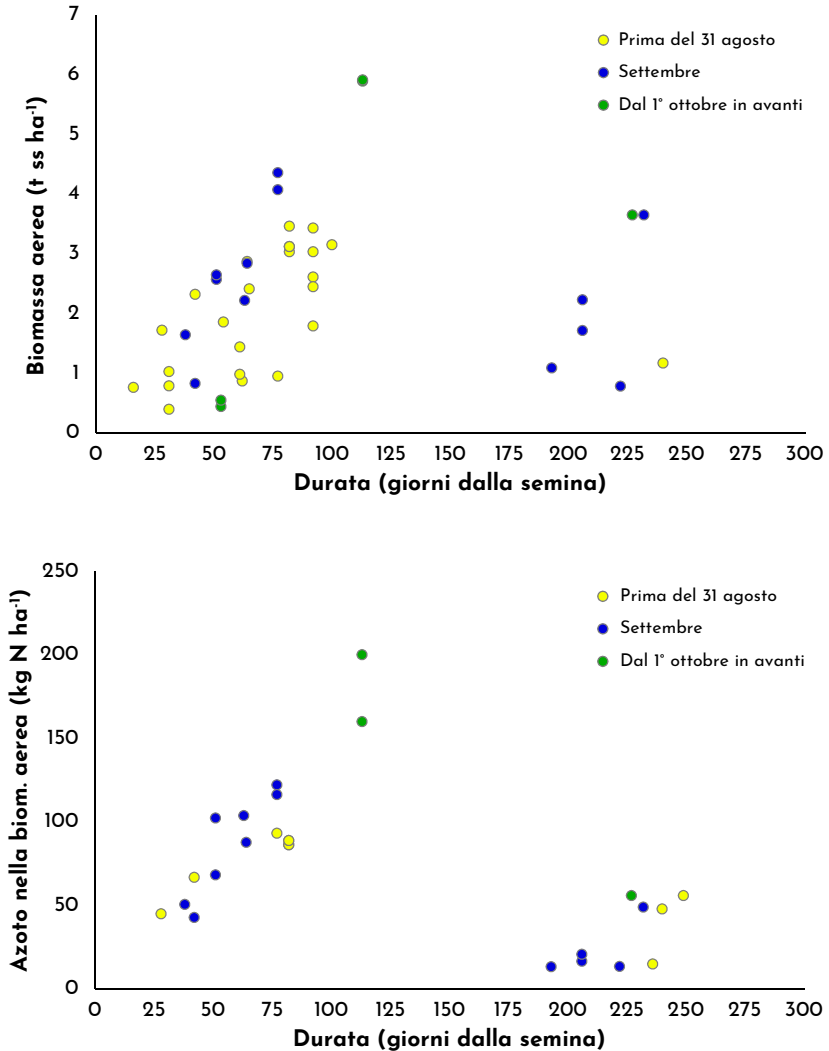


Figura 3.1 Biomassa aerea di senape bianca (in alto) e azoto da essa asportato (in basso) in funzione del tempo trascorso dalla semina. I risultati, suddivisi per epoca di semina, sono il risultato di una rassegna bibliografica di lavori sperimentali condotti in ambienti temperati.



Figura 3.2 Cover crop di senape bianca in novembre (in alto) e all'uscita dall'inverno (in basso). Nel primo caso si può apprezzare la notevole crescita e il completo contenimento delle infestanti. Nel secondo caso si nota la completa distruzione della coltura da parte del gelo.

La senape bianca (**Figura 3.2**) riesce a raggiungere biomasse anche consistenti dopo pochi mesi di coltivazione: a 90-100 giorni dalla semina, prima dell'arrivo del gelo invernale che normalmente causa la terminazione della coltura, si possono raggiungere infatti biomasse di quasi 4 t ss ha^{-1} (**Figura 3.1**, in alto); produzioni maggiori sono invece molto più rare. I dati disponibili sembrerebbero suggerire un tasso di crescita maggiore per le semine in settembre rispetto a quelle effettuate in agosto o prima, forse a causa di minori limitazioni idriche nel primo caso. Le corrispondenti asportazioni di azoto (**Figura 3.1**, in basso) sono piuttosto elevate, in quanto possono raggiungere e superare i 100 kg N ha^{-1} ; si notino nella parte destra del grafico i più bassi valori di azoto (inferiori a $50\text{-}60 \text{ kg N ha}^{-1}$) rimasto nella biomassa aerea sopravvissuta dopo l'inverno, spesso costituita solo dagli steli.

Nei lavori da noi censiti la segale (**Figura 3.3**) è stata quasi sempre seminata più tardi rispetto alla senape: prevalgono infatti i dati relativi a semine effettuate dal mese di ottobre in avanti (**Figura 3.4**, in alto). L'accumulo di biomassa può raggiungere valori molto più alti rispetto alla senape (in diversi casi 8 t ss ha^{-1}); tale risultato si verifica però più tardi, indicativamente a partire da cinque mesi dopo la semina, indice di una maggiore importanza della crescita primaverile rispetto a quella autunnale. Nel caso della segale, inoltre, che è una specie non geliva, non si assiste a una diminuzione della biomassa nel periodo di crescita più avanzato. Le asportazioni di azoto (**Figura 3.4**, in basso) hanno un ordine di grandezza simile a quello della senape, con una prevalenza di valori inferiori a 100 kg N ha^{-1} .



Figura 3.3 Cover crop di segale in novembre (in alto) e all'uscita dall'inverno (in basso). Nel primo caso si notano l'ottima copertura del terreno e il contenimento delle infestanti. Nel secondo caso si riscontra una buona sopravvivenza della coltura dopo l'inverno.

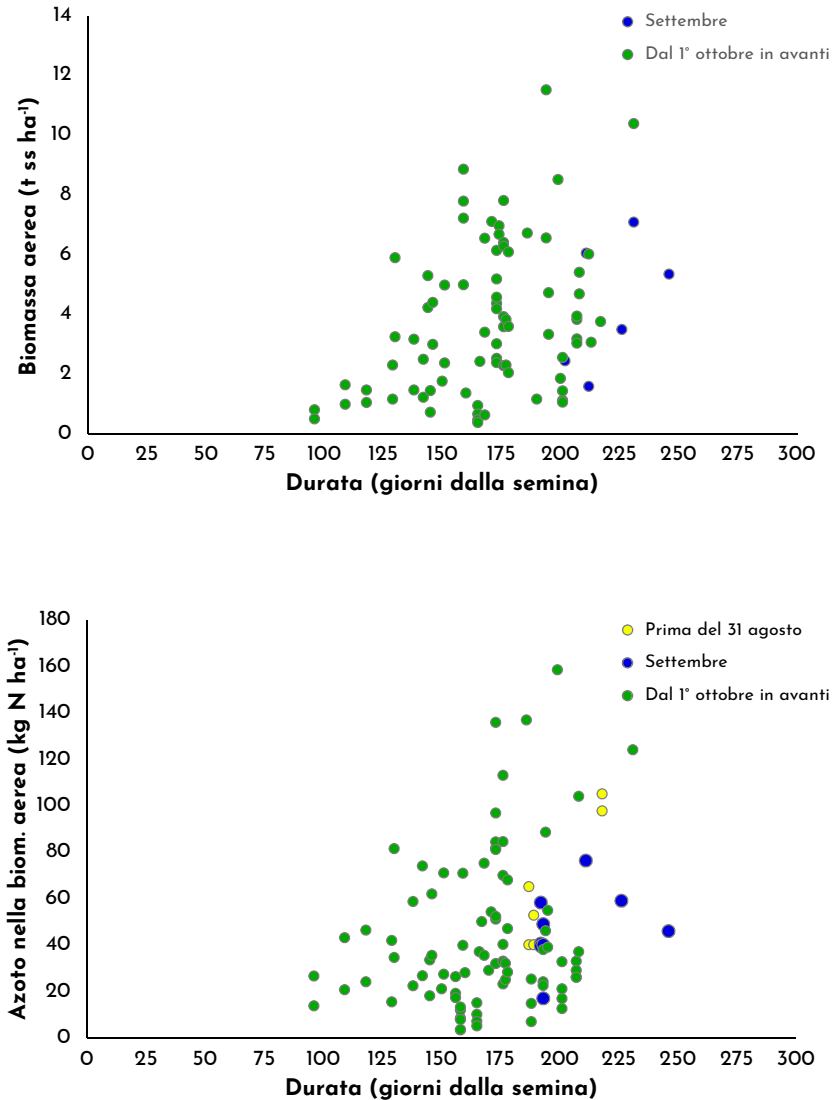


Figura 3.4 Biomassa aerea di segale (in alto) e azoto da essa asportato (in basso) in funzione del tempo trascorso dalla semina. I risultati, suddivisi per epoca di semina, sono il risultato di una rassegna bibliografica di lavori sperimentali condotti in ambienti temperati.



Figura 3.5 Cover crop di veccia villosa in novembre (in alto) e all'uscita dall'inverno (in basso). Nel primo caso si riscontra un'abbondante crescita anche se con qualche pianta infestante. Nel secondo caso si riscontra una discreta sopravvivenza della coltura dopo l'inverno.

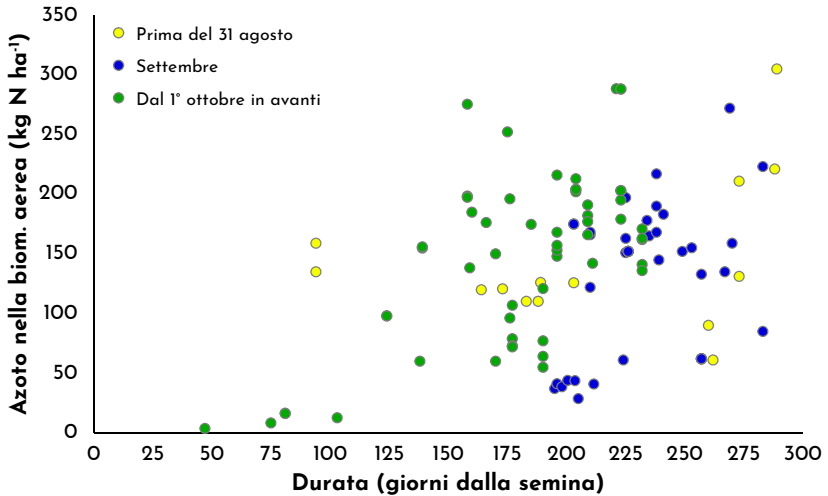
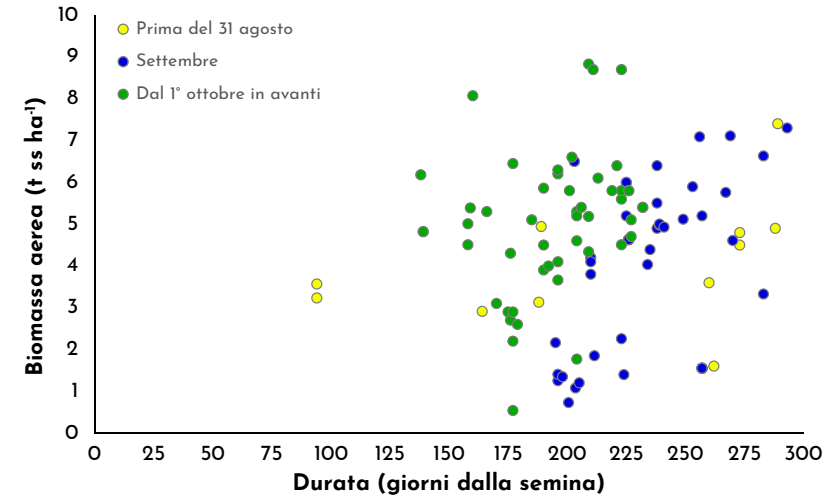


Figura 3.6 Biomassa aerea di *veccia villosa* (in alto) e azoto da essa asportato (in basso) in funzione del tempo trascorso dalla semina. I risultati, suddivisi per epoca di semina, sono il risultato di una rassegna bibliografica di lavori sperimentali condotti in ambienti temperati.

Per la veccia villosa (**Figura 3.5**) tornano a essere più numerosi i casi di semina in settembre, anche se questi sono caratterizzati da un accumulo più lento della biomassa. Rispetto alla segale, con poche eccezioni nel campione di dati raccolti non sono disponibili risultati prima del quinto mese dalla semina. A partire da tale data, le più alte biomasse registrate superano le 8 t ss ha^{-1} (**Figura 3.6**, in alto), con numerosi valori maggiori di 6 t ss ha^{-1} . Neanche per la veccia, anch'essa specie non geliva, si assiste a una diminuzione della biomassa dopo il gelo invernale. Le asportazioni di azoto della veccia (**Figura 3.6**, in basso) sono molto più elevate rispetto alle altre due specie non leguminose: a partire dal quinto mese dalla semina esse possono superare i 200 kg N ha^{-1} con alcuni casi meno frequenti vicino ai 300 kg N ha^{-1} . I pochissimi dati disponibili per semine precoci suggeriscono anche che consistenti asportazioni (circa 150 kg N ha^{-1}) possano essere raggiunte già circa tre mesi dopo la semina.

Tutti i risultati confermano comunque l'estrema variabilità della produttività e dell'asportazione di azoto, risultato di diverse condizioni ambientali e gestionali. Se è vero infatti che esistono elevati valori biologicamente raggiungibili (quelli da noi messi in evidenza), è anche vero che a parità di tempo trascorso dalla semina sono stati misurati anche valori molto più ridotti, segno della presenza di fattori limitanti (radiazione, temperatura, acqua, azoto) che non hanno consentito elevati tassi di crescita. Se ne conclude quindi che stimare tali grandezze sulla base di esperienze passate può risultare difficile e che se è necessario conoscerle la loro misura risulta importante.

3.4 Produttività della coltura da reddito in successione alle cover crop

Le cover crop possono influenzare in molti modi la produttività della successiva coltura da reddito, principalmente attraverso la conservazione o meno dell'acqua nel suolo, la modifica della disponibilità di nutrienti, e gli effetti sulla banca semi e sulla crescita delle erbe infestanti. Marcillo e Miguez (2017) hanno condotto una meta-analisi degli effetti delle cover crop sulla resa del mais in successione, sintetizzando i risultati di 268 osservazioni ottenute

in 65 studi condotti negli USA e in Canada tra il 1965 e il 2015 attraverso il calcolo di un rapporto relativo (RR = resa del mais dopo cover crop/resa del mais dopo il controllo senza cover crop). Le cover crop graminacee hanno mostrato un effetto neutro sulla resa del successivo mais, che non è stata significativamente diversa dal controllo (l'intervallo di confidenza al 95% di RR era compreso tra 0,98 e 1,02), mentre le leguminose hanno avuto un effetto positivo medio di +21% (RR = 1,17-1,29). La risposta positiva alle cover crop leguminose si è verificata solo in presenza di fertilizzazioni azotate al mais inferiori a 200 kg N ha⁻¹ (+33% con fertilizzazioni comprese tra 0 e 99 kg N ha⁻¹ e +9% se comprese tra 100 e 199 kg N ha⁻¹), indicando che il loro effetto è legato alla aumentata disponibilità di azoto, pur se gli autori ricordano che le cover crop potrebbero avere apportato anche altri vantaggi (conservazione dell'acqua e di altri nutrienti nel suolo, controllo di parassiti). Nell'ambito delle cover crop leguminose, Marcillo e Miguez (2017) hanno anche riscontrato un effetto delle lavorazioni, con effetti più contenuti (+15%) per le lavorazioni convenzionali e maggiori (+30%) in regime di non lavorazione; gli autori ipotizzano che tale differenza sia dovuta a una messa a disposizione dell'azoto troppo rapida nel caso della terminazione delle cover crop leguminose con lavorazioni convenzionali. Anche nel caso dei miscugli, infine, l'effetto medio è stato statisticamente significativo (+13%). Risultati simili sono stati ottenuti nella meta-analisi di Tonitto et al. (2006), che a differenza della precedente non era limitata solo al mais; anch'essi hanno riscontrato assenza di effetti statisticamente significativi sulla resa della coltura da reddito concimata come raccomandato dai disciplinari di produzione dopo cover crop non leguminose (-3%), e un aumento del 5% della resa dopo cover crop leguminose quando la coltura da reddito dopo il controllo era concimata con modeste quantità di azoto; quando invece la concimazione della coltura da reddito dopo il controllo era quella raccomandata dai disciplinari di produzione, si è riscontrato in media un calo di resa del 10%. Anche in questo caso, l'effetto delle leguminose è stato fortemente legato all'apporto di azoto: quando le cover crop contenevano tra 110 e 180 kg N ha⁻¹, non si è verificato un calo di resa della coltura da reddito, e addirittura si è verificato un aumento del 5% con contenuti maggiori di 180 kg N ha⁻¹.

Simili risultati sono stati ottenuti recentemente anche da Valkama et al. (2015) in una meta-analisi relativa a studi condotti in Danimarca, Svezia, Finlandia e Norvegia: essi hanno documentato una modesta riduzione di resa della coltura da reddito (-3%) a seguito di cover crop non leguminose e un aumento del 6% dopo cover crop leguminose e miscugli. Anche una sintesi degli esperimenti condotti in Francia (287 casi) segnala che l'aumento medio di resa della coltura da reddito che segue la cover crop è dell'1%, e che la maggior parte dei casi si collocano tra una perdita di resa del 15% e un aumento di resa del 15% (Labreuche et al., 2006).

Se ne conclude che l'aumento di resa atteso dalla coltivazione di cover crop non leguminose è molto modesto e probabilmente trascurabile ai fini pratici anche nel lungo periodo, mentre per le leguminose tale aumento può essere più consistente e degno di attenzione.

3.5 Valore fertilizzante azotato delle cover crop

L'effetto delle cover crop sulla resa della coltura in successione è spesso almeno in parte spiegabile assumendo che le cover crop aumentino o diminuiscano la disponibilità di azoto rispetto al caso in cui il terreno sia rimasto senza cover crop prima della semina della coltura da reddito.

3.5.1 Competizione preventiva e mineralizzazione netta

Thorup-Kristensen et al. (2003) e Cohan e Castillon (2010) affermano che l'effetto netto azotato (cioè la maggiore o minore disponibilità di azoto rispetto al controllo senza cover crop) è composto da due quote additive. La prima quota, che può ridurre la disponibilità dell'elemento, è chiamata "competizione preventiva" ed è data dall'eventuale minore disponibilità di azoto minerale nel terreno al momento della terminazione della cover rispetto al controllo senza cover crop; tale eventualità è causata dall'asportazione di azoto da parte della cover crop ed è particolarmente probabile in periodi autunno-invernali poco piovosi, che riducono la lisciviazione di azoto dal controllo senza cover crop. La seconda quota è la quantità di azoto mineralizzata dai tessuti della cover crop durante la loro decomposizione dopo la terminazione; tale quantità dipende dall'azoto contenuto nei tessuti della cover crop, dalla loro suscettibilità alla

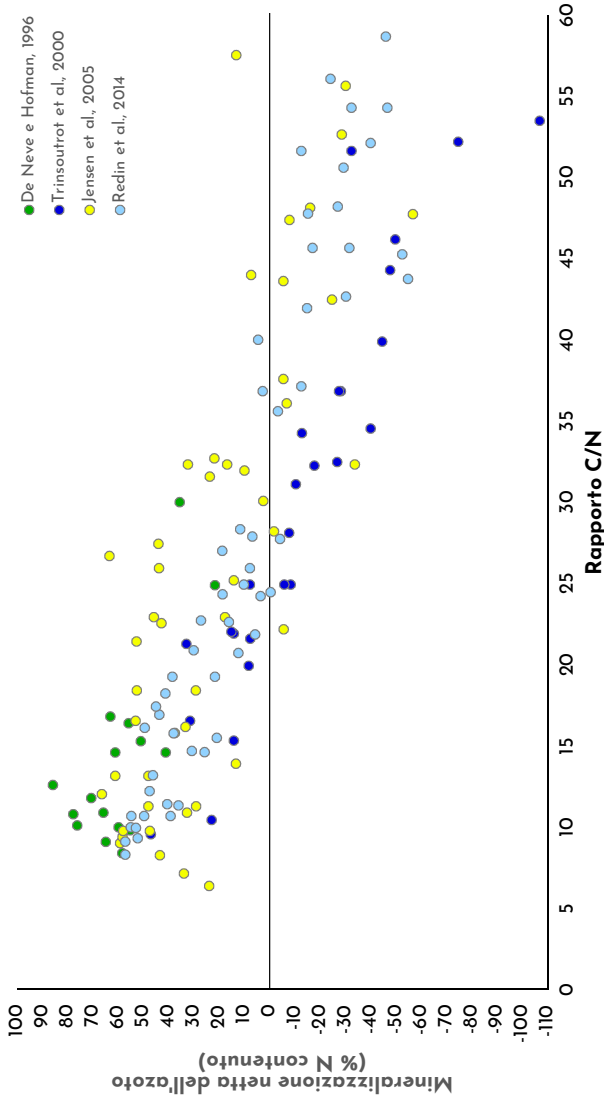


Figura 3.7 Mineralizzazione netta dell'azoto di matrici vegetali in funzione del loro rapporto carbonio/azoto. I dati, selezionati per l'intervallo di rapporti C/N compresi tra 0 e 60, sono tratti da De Neve e Hofman (1996), Trinsoutrot et al. (2000), Jensen et al. (2005), Redin et al. (2014).

decomposizione (anche in funzione delle condizioni pedologiche e meteorologiche) e dal rapporto C/N, che influenza l'equilibrio tra mineralizzazione e immobilizzazione di azoto. In generale, elevati rapporti C/N riducono la mineralizzazione a favore dell'immobilizzazione. I due processi si equivalgono (e quindi la mineralizzazione netta è zero) intorno a valori che a seconda delle fonti oscillano tra 15 e più di 30; un esempio da noi compilato assemblando dati di letteratura relativi ad incubazioni di residui vegetali in laboratorio è riportato in **Figura 3.7**, che descrive la mineralizzazione netta al variare del rapporto C/N delle matrici.

Nella **Figura 3.7** sono riportate solo le misure effettuate nei casi in cui il rapporto C/N era compreso tra 0 e 60, in quanto più rappresentative dei residui di cover crop. I risultati mostrano chiaramente che con residui con un'elevata concentrazione di azoto (caratterizzati da rapporti C/N indicativamente inferiori a 15) la mineralizzazione netta può essere elevata e raggiungere l'80% dell'azoto contenuto nella biomassa vegetale. Con rapporti C/N compresi tra 15 e 30 la mineralizzazione netta è inferiore ma generalmente positiva (anche se con risultati molto variabili tra lo 0% e il 50% circa). Infine, con rapporti C/N superiori a 30 la mineralizzazione netta è generalmente negativa, cioè parte dell'azoto minerale del terreno è usato dalla biomassa microbica per condurre la decomposizione dei residui.

I risultati sperimentali di pieno campo indicano che gli effetti netti sono generalmente modesti per le cover crop non leguminose (che spesso hanno rapporti C/N più elevati), raggiungendo tra lo 0 e il 25% dell'azoto asportato dalle cover crop (Thorup-Kristensen et al., 2003), corrispondenti spesso al massimo a poche decine di kg N ha⁻¹, o addirittura a un effetto nullo. Ad esempio, sulla base di un esperimento di durata decennale, Cohan (2011) riferisce che, anche se una cover crop di loglio italico ha fornito 15-30 kg N ha⁻¹ al mais, questa già modesta quantità è stata compensata dalla competizione preventiva, che è stata dello stesso ordine di grandezza del rilascio di azoto e che ha quindi reso prossimo a zero l'effetto netto complessivo. È da notare che gli effetti netti possono addirittura essere negativi (Thorup-Kristensen et al., 2003) quando la competizione preventiva supera la mineralizzazione di azoto.

Per le cover crop leguminose, in particolare se la loro crescita primaverile è stata abbondante grazie anche a una terminazione non troppo precoce, gli effetti sono generalmente più alti, potendo raggiungere e superare i 100 kg N ha⁻¹.

3.5.2 Valore fertilizzante equivalente

Quando negli esperimenti gli effetti delle cover crop sono confrontati con quelli dei fertilizzanti minerali è possibile definire un valore fertilizzante equivalente, o valore di sostituzione. Esso è definito come la quantità di fertilizzante minerale azotato che consente, in assenza di cover crop, di raggiungere la medesima resa (o la medesima asportazione di azoto) della coltura da reddito dopo cover crop. Il valore fertilizzante equivalente include anche effetti indiretti non dovuti all'azoto e può quindi essere maggiore degli effetti netti sopra riportati. Thorup-Kristensen et al. (2003) segnalano che il valore fertilizzante equivalente oscilla in un ampio intervallo, ovvero tra valori negativi e 200 kg N ha⁻¹; ciò è dovuto all'elevata variabilità dei fattori ambientali e gestionali già elencati. Sul valore fertilizzante equivalente esiste un solo lavoro di sintesi (Ketterings et al., 2015), dedicato agli allevatori da latte del nord est americano, che indica come valori più frequenti per le cover crop leguminose 50-100 kg N ha⁻¹; per quanto riguarda le cover crop graminacee tali autori ricordano l'importanza che l'immobilizzazione di azoto subito dopo la terminazione della cover crop può avere sulla disponibilità dell'elemento per la successiva coltura da reddito, ma non forniscono sintesi dei valori fertilizzanti equivalenti per questo gruppo di cover crop.

3.5.3 Effetti residui

Le cover crop possono esercitare un effetto fertilizzante anche negli anni successivi a quello della loro distruzione, a causa della decomposizione protratta nel tempo dei pool organici apportati al suolo. Thorup-Kristensen et al. (2003) riportano tassi di mineralizzazione del 4-10% nel secondo anno, e più bassi successivamente. Naturalmente ci si attende che tali piccoli effetti residui si sommino tra loro e siano quindi complessivamente più elevati se le cover crop sono coltivate per più anni di seguito. Mahal et al. (2018) riportano infatti un aumento dell'azoto potenzialmente mineralizzabile a seguito dell'utilizzo di cover crop leguminose e di miscugli contenenti leguminose del 211% e 77% rispettivamente, mentre non

segnalano effetti per le cover crop non leguminose. Justes (2017) indica che una situazione di equilibrio si verifica dopo 20-40 anni di uso continuo delle cover crop, e che già dopo 10 anni sarà necessario ridurre l'uso di fertilizzanti nella coltura da reddito, a causa di un'aumentata disponibilità di azoto.

3.6 Effetti delle cover crop sulle perdite di azoto

La riduzione delle perdite di azoto per lisciviazione è uno degli effetti più importanti e documentati delle cover crop; tale effetto è conseguenza soprattutto della riduzione della concentrazione di azoto dell'acqua di drenaggio, ma anche della riduzione del drenaggio stesso grazie alla traspirazione. Tonitto et al. (2006) hanno riportato che l'effetto delle cover crop è quello di ridurre questa voce di perdita di azoto dal suolo, in media del 70% per le cover crop non leguminose, e, pur con una più ridotta base sperimentale, del 40% per le leguminose; in pochissimi casi le cover crop hanno causato un aumento della lisciviazione. Simili riduzioni della lisciviazione per le cover crop non leguminose (-50%) sono stati riportati nel lavoro relativo al Nord Europa già citato di Valkama et al. (2015), mentre per le leguminose questi autori non hanno osservato una riduzione della lisciviazione. Anche Justes (2017) indica che la riduzione della lisciviazione è del 30-90% per le cover crop non leguminose (graminacee e brassicacee) e dello 0-40% per le leguminose. Le minori riduzioni della lisciviazione conseguite dalle leguminose sono spiegabili ricordando che parte dell'azoto contenuto nella loro biomassa non è sottratto al terreno ma proviene dall'atmosfera attraverso la fissazione biologica.

Un tema più controverso è quello delle emissioni di protossido d'azoto (N_2O). Le cover crop infatti agiscono in modo differenziato (in base alla specie e al periodo) sulla concentrazione di nitrati nel terreno; inoltre esse possono ridurre il contenuto idrico del terreno durante la loro crescita, ma anche contribuire a conservarlo dopo la terminazione, quando esercitano un effetto pacciificante; infine, forniscono materiale organico facilmente decomponibile. Tutti questi fattori hanno importanti effetti sulle emissioni di N_2O , che a volte potrebbero essere aumentate e altre volte diminuite dalla coltivazione delle cover crop. Basche et al. (2014)

hanno condotto una meta-analisi di 26 articoli (106 osservazioni) relativi alle emissioni di N_2O a seguito della coltivazione di cover crop. Essi hanno constatato che nel 40% dei casi le cover crop riducevano le emissioni (rispetto al caso in cui le cover crop erano assenti), mentre le aumentavano nel restante 60% dei casi. In media, le cover crop leguminose hanno causato emissioni 5,86 volte più elevate rispetto al controllo senza cover crop, mentre le non leguminose e i miscugli di due specie non se ne sono differenziati. Più in particolare, le cover crop leguminose si sono distinte dalle non leguminose soprattutto quando la concimazione azotata era nulla o scarsa (inferiore a 150 kg N ha^{-1}): in tali casi le leguminose hanno causato un aumento delle emissioni, mentre le non leguminose non hanno avuto effetti significativi o hanno ridotto le emissioni. Uno dei risultati più interessanti dell'analisi di Basche et al. (2014) è relativo all'influenza del periodo di misura: quando sono state misurate su un intero anno, le emissioni non sono risultate significativamente diverse dal controllo senza cover crop, suggerendo che su scale temporali ampie l'effetto delle cover crop sia neutrale. Invece, le emissioni sono state 5,93 volte maggiori del controllo subito dopo la terminazione, quindi quando plausibilmente esisteva una maggiore disponibilità sia di nitrato sia di carbonio organico in decomposizione; gli autori hanno anche riscontrato che tale effetto era legato a bassi rapporti C/N della biomassa in decomposizione (inferiori a 15-20). Viceversa, le emissioni misurate durante il periodo di coltivazione delle cover crop sono state statisticamente non differenti da quelle del controllo senza cover crop. Basche et al. (2014) hanno anche valutato gli effetti della gestione del residuo di cover crop dopo la terminazione, riscontrando perdite 5,94 volte più alte rispetto al controllo quando la biomassa era incorporata nel terreno, mentre le perdite non sono state significativamente diverse dal controllo quando la cover crop veniva lasciata in superficie.

3.7 Effetti delle cover crop sulla sostanza organica del suolo

Un effetto molto importante delle cover crop è quello di apportare sostanza organica al terreno e migliorarne quindi la fertilità fisica, chimica e biologica (**Figura 3.8**).



Figura 3.8 Le cover crop restituiscono residui vegetali al terreno, contribuiscono ad alimentarne la sostanza organica e a controllare le erbe infestanti. Nelle foto sono rappresentati residui di avena strigosa allettati (in alto) e di tillage radish (al centro) con effetto pacciamante, e le radici di un miscuglio avena-veccia.

Poepplau e Don (2015) hanno condotto una meta-analisi di 30 studi, relativi a 37 siti e 27 specie di cover crop, nei quali è stato misurato l'effetto delle cover crop sullo stock di carbonio (C) organico dello strato superficiale di terreno. La maggior parte degli esperimenti avevano una durata inferiore ai 20 anni. Nella maggior parte dei casi considerati (126 osservazioni su 139) si è verificato un aumento di stock di C a seguito dell'utilizzo di cover crop rispetto al controllo. I restanti casi, in cui si è osservata una diminuzione dello stock, appartengono a esperimenti di breve durata (al massimo sei anni), nei quali è stato più difficile, a causa della variabilità spaziale del terreno, mettere in evidenza differenze tra lo stock di C nel trattamento con cover crop e quello del controllo. Nel 73% dei casi l'aumento è stato compreso tra 0 e $1 \text{ t C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. L'incremento medio annuo dello stock di carbonio organico è stato di $320 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$; tuttavia la variabilità attorno a questa media è stata molto elevata (presumibilmente anche a causa della scarsa durata come già accennato), ed è stato possibile spiegarla solo in parte con l'elevazione (che riduceva l'incremento di C) e la profondità di campionamento (che lo aumentava). Non sono invece stati riscontrati effetti significativi né del tipo di cover crop (leguminose o non leguminose) né delle lavorazioni, presumibilmente a causa di un'insufficiente dimensione dell'insieme di dati utilizzato. Gli autori sottolineano infine il fatto che gli stock di C potrebbero essere stati sottostimati, poiché, essendo misurati solo nello strato lavorato, non includono il C apportato dagli apparati radicali profondi di alcune cover crop.

3.8 Effetti delle cover crop sulla gestione delle piante infestanti

Le cover crop possono ridurre anche molto marcatamente la crescita delle piante infestanti quando vegetano in campo (**Figura 3.9**). Inoltre, possono controllare le erbe infestanti durante il periodo di crescita della successiva coltura da reddito (Teasdale, 1996), di solito perché la loro biomassa resta sul terreno dopo la terminazione, svolgendo un effetto pacciamante che riduce la penetrazione della radiazione e l'escursione termica del terreno, costituisce un impedimento fisico alla crescita delle plantule di infestanti e infine può determinare effetti allelopatici (**Figura 3.8** in alto e in mezzo). In alternativa, le cover crop possono essere traseminate nella coltura



Figura 3.9 L'effetto di contenimento delle piante infestanti da parte delle cover crop si può apprezzare in queste foto che mostrano, all'uscita dall'inverno, il controllo spontaneamente inerbito senza cover crop (in alto) e la parcella, coltivata nello stesso sito, che ospita la senape bianca, terminata dal gelo e caratterizzata da una molto minore presenza di infestanti (in basso).

da reddito e quindi competere con le piante infestanti quando sono ancora vive.

Il controllo delle erbe infestanti esercitato dallo strato pacciamante dipende dalla quantità di biomassa rimasta sul terreno ed è più efficace verso le specie infestanti con semi piccoli e verso le specie più sensibili alla luce per l'avvio della germinazione (Teasdale, 1996). Inoltre, l'effetto dipende dalla persistenza dello strato pacciamante (Osipitan et al., 2018), che a seconda di molti fattori ambientali e gestionali può garantire o meno la copertura del terreno per l'intero periodo di coltivazione della coltura da reddito.

Osipitan et al. (2018) hanno condotto una meta-analisi di 46 studi dell'effetto di contenimento delle piante infestanti, sia al momento della terminazione della cover crop, sia nelle sette settimane successive alla semina della coltura da reddito, confrontando il trattamento con cover crop e il trattamento in cui il controllo delle malerbe era condotto con mezzi chimici, meccanici o manuali. Gli studi erano stati condotti principalmente negli USA (72% dei casi), e quasi tutti (94%) avevano previsto l'impiego di cover crop autunno-vernine.

I risultati di questa meta-analisi indicano che le cover crop riducono la biomassa e la densità delle malerbe, sia al momento della terminazione sia durante la crescita della successiva coltura da reddito. La riduzione è stata in media di -430 e -260 kg ha⁻¹ per la biomassa delle infestanti (rispettivamente alla terminazione e durante la crescita), e di -6 e -35 piante m⁻² per la densità. Anche se le differenze medie sono significativamente diverse da zero (indicando quindi che in media le cover crop sono efficaci nel controllo delle malerbe in queste fasi), va sottolineato che non in tutti gli studi l'effetto era statisticamente significativo, poiché in alcune situazioni la presenza di infestanti era simile nel trattamento con cover crop e nel trattamento senza cover crop. Le rese delle colture da reddito non sono state influenzate dalla presenza o meno della cover crop nel caso delle colture da granella (mais, soia, frumento), mentre per le colture orticole si è riscontrato un aumento di produzione a seguito delle cover crop. Questo effetto si sarebbe presumibilmente verificato a causa della minore durata del periodo di crescita delle colture orticole rispetto agli altri seminativi, che avrebbe garantito una più efficace azione di controllo delle infestanti da parte dello strato pacciamante. Inoltre, sono stati ottenuti effetti simili tra le cover crop coltivate in purezza e quelle coltivate in miscuglio, e tra le cover crop "a foglia stretta" e quelle "a foglia larga".



4 Prove di campo

4.1 Introduzione

Attualmente l'impiego delle cover crop nei nostri areali è limitato dalla mancanza di solide conoscenze sulle specie da adottare, le tecniche di coltivazione (epoca di semina e di terminazione; modalità di terminazione), la capacità di ridurre la lisciviazione di azoto e di contenere la flora infestante, gli effetti sulle colture successive in termini di restituzione di elementi nutritivi (in particolare l'azoto), e la loro introduzione all'interno della programmazione aziendale poiché non producono reddito in maniera diretta.

Nell'ambito del progetto CoCrop abbiamo condotto una prova biennale finalizzata ad indagare alcuni punti critici che limitano ad oggi l'impiego delle cover crop nell'areale maidicolo lombardo. In particolare, abbiamo misurato la produzione di biomassa aerea e l'asportazione di azoto di cinque cover autunno-vernine seminate in due diverse epoche, e in due diversi contesti di fertilità iniziale del suolo. La prova è stata condotta in due località, un'azienda zootecnica ed una cerealicola.

4.2 Materiali e Metodi

4.2.1 Siti sperimentali

Le prove di campo hanno avuto durata biennale e sono state condotte presso le due aziende agricole del progetto: 1) l'Azienda Agricola della Fondazione Morando Bolognini, sita in Sant'Angelo

◀ Coperture del suolo presenti il 2 novembre 2017 nel campo sperimentale del progetto CoCrop realizzato a Sant'Angelo Lodigiano presso la C.na Santa Martina della Fondazione Morando Bolognini: controllo inerbito (1); senape bianca (2); veccia villosa (3); avena strigosa (4); segale (5); trifoglio alessandrino (6). La semina è stata eseguita il 6 settembre.

Lodigiano (Pavia), 45°13'57.6"N 9°25'36.7"E; 2) Azienda agricola Motti, sita in Orzinuovi (Brescia), 45°23'53.0"N 9°54'33.8"E.

Il suolo di Sant'Angelo ha le seguenti caratteristiche: tessitura franca (45% sabbia, 41% limo e 14% argilla), assenza di scheletro, reazione subacida (pH in acqua 6.0) e 1.5% p.p. di sostanza organica (C/N 8.8). Il suolo di Orzinuovi presenta tessitura franco-sabbiosa (54% sabbia, 31% limo e 15% argilla), elevata presenza di scheletro (54% p.p.), reazione neutra (pH in acqua 6.8) e 3.9% p.p. di sostanza organica (C/N 9.1).

Il clima di Sant'Angelo Lodigiano è caratterizzato da precipitazioni medie annuali di 830 mm e temperatura media di 13.2°C, mentre il clima di Orzinuovi da precipitazioni medie annuali di 957 mm e una temperatura media di 14.4°C (**Tabella 4.1**).

Tabella 4.1. Temperatura media mensile e precipitazioni cumulate mensili nelle due località.

Mese	Sant'Angelo Lodigiano						Orzinuovi					
	Media 1988-2016		2017		2018		Media 1988-2016		2017		2018	
	T med. (°C)	Prec. (mm)	T med. (°C)	Prec. (mm)	T med. (°C)	Prec. (mm)	T med. (°C)	Prec. (mm)	T med. (°C)	Prec. (mm)	T med. (°C)	Prec. (mm)
G	2	53	-1	4	5	39	3	57	2	4	7	39
F	4	52	6	49	4	30	5	53	7	53	5	22
M	9	52	11	36	7	119	10	53	13	27	8	129
A	13	82	14	71	16	82	14	85	15	68	17	80
M	18	82	18	61	18	146	19	98	20	85	21	129
G	22	64	24	60	22	63	23	89	25	96	24	82
L	24	44	24	27	24	92	25	67	26	55	26	129
A	23	67	25	3	24	98	25	90	27	26	27	91
S	19	78	18	143	21	10	20	99	19	87	23	40
O	14	102	14	3	15	104	15	105	16	13	17	129
N	7	101	7	95	9	122	9	100	9	74	11	76
D	3	53	2	46	3	15	4	60	4	49	5	18

4.2.2 Fattori sperimentali

I fattori sperimentali studiati sono stati: 1) la specie di cover crop; 2) la data di semina; 3) la concentrazione di azoto iniziale nel

terreno alla semina delle cover crop. L'ultimo fattore sperimentale è stato studiato soltanto nella prova di Sant'Angelo Lodigiano. I fattori sono stati organizzati in un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con struttura gerarchica (blocco, semina, tipo di cover crop e concentrazione di azoto nel terreno alla semina), e sono stati applicati sulle stesse parcelle (di 48 m²) nei due anni di prova.

Le cover crop utilizzate sono state due graminacee (*Avena strigosa* Schreb. var. Saia 6 e *Secale cereale* L. var. Stanko), due leguminose (*Trifolium alexandrinum* L. var. Mario e *Vicia villosa* Roth var. Villana) e una brassicacea (*Sinapis alba* L. var. Architect). Le cover si differenziano anche in base alla resistenza al freddo: ingelive la segale e la veccia e gelive le altre. In entrambe le prove è stato considerato anche un controllo con inerbimento spontaneo ed uno completamente diserbato.

Le due date di semina sono state una a fine agosto-inizio settembre (S1) dopo una raccolta precoce del mais (30 agosto 2017 e il 5 settembre 2018 ad Orzinuovi, il 6 settembre 2017 e 2018 a Sant'Angelo Lodigiano), ed una a metà settembre (S2) rappresentativa di una raccolta più tardiva (14 settembre 2017 e 18 settembre 2018 ad Orzinuovi, e il 22 settembre 2017 e 2018 a Sant'Angelo Lodigiano).

I due livelli di azoto rappresentano una situazione di basso ed elevato residuo di azoto minerale dopo la raccolta del mais e sono stati realizzati utilizzando il naturale livello di azoto presente alla semina delle cover crop (N0, nessuna concimazione), o concimando con 50 kg N ha⁻¹ anno⁻¹ (N1) in presemina utilizzando nitrato di calcio ed uno spandiconcime pneumatico ELHO M1000.

4.2.3 Tecnica colturale

La lavorazione del terreno è stata eseguita 1-2 giorni prima della semina, a circa 15 cm di profondità, con coltivatori da minima lavorazione: LEMKEN KARAT 9/300, a Sant'Angelo Lodigiano e Kverneland CLC Evo 300 ad Orzinuovi. La semina delle cover crop è stata eseguita con seminatrici universali compatibili con la minima lavorazione (SULKY TRAMLIN CE 300, a Sant'Angelo Lodigiano) o su sodo (John Dheere 750 A ad Orzinuovi). Le sementi sono state acquistate da Padana Sementi Elette S.r.l., Tombolo (PD) e sono state seminate con le seguenti quantità (kg seme ha⁻¹): avena 50, segale 150, trifoglio 25, veccia 40 e senape 15. Per

fronteggiare l'andamento meteorologico siccitoso, a Sant'Angelo Lodigiano il 10 ottobre 2017 si è reso necessario un intervento d'irrigazione di soccorso, eseguito per aspersione con rotolone ed apportando 25 mm di acqua. Un'irrigazione di soccorso è stata invece eseguita per scorrimento ad Orzinuovi il 27 settembre 2018. La terminazione delle cover crop è avvenuta con glifosate (1.78 kg ha^{-1}) il 28 e il 14 marzo 2018 a Sant'Angelo Lodigiano e ad Orzinuovi. Dopo la terminazione delle cover crop, il campo è stato nuovamente lavorato con gli erpici da minima lavorazione, è stato concimato con NPK (6-12-24 alla dose di 400 kg ha^{-1}) ed è stato seminato il mais (14 maggio e 1 aprile 2018 a Sant'Angelo Lodigiano e ad Orzinuovi). Il mais è stato rincalzato e concimato in copertura con urea alla dose di 115 (Sant'Angelo Lodigiano) e 150 (Orzinuovi) kg N ha^{-1} . La quantità di fertilizzante azotato è stata calcolata utilizzando il bilancio dell'azoto proposto dalla Regione Lombardia nell'ambito dell'operazione 10.1.01 "Produzioni agricole integrate" del Piano di Sviluppo Rurale 2014-2020 (b.u.r.l. Serie ordinaria 6 del 08/02/2018). Tuttavia, a differenza della comune patrica aziendale che mira all'ottenimento del massimo livello produttivo, la concimazione è stata sub-ottimale, in modo tale da garantire una crescita non stentata delle piante, ma senza incorrere in un consumo di lusso. La raccolta è avvenuta in data 28 agosto 2018 (a Sant'Angelo Lodigiano) e 7 agosto 2018 (ad Orzinuovi).

4.2.4 Analisi

La biomassa vegetale presente nelle parcelle è stata campionata nelle seguenti date: 20 novembre 2017 e 14 novembre 2018 a Sant'Angelo Lodigiano e 22 novembre di entrambi gli anni ad Orzinuovi. La data di campionamento è stata scelta perché rappresenta il massimo accumulo di biomassa nelle cover crop gelive e fornisce quindi un'indicazione sulla capacità delle diverse cover di asportare azoto e produrre sostanza organica nel periodo autunnale. Viceversa, le cover crop ingelive mostrano un ulteriore accrescimento all'uscita dell'inverno fino alla loro terminazione in marzo. La biomassa aerea secca delle cover crop, delle erbe infestanti, e quella totale (cover crop + erbe infestanti) è stata determinata tramite prelievo da ogni parcella 1 m^2 di vegetazione e successiva essiccazione a 105°C . La biomassa aerea

di mais è stata invece campionata allo stadio fenologico di sesta foglia (V6, Ritchie et al., 1992) il 6 giugno 2018 e il 17 maggio 2018 a Sant'Angelo Lodigiano e ad Orzinuovi, rispettivamente, e in corrispondenza della raccolta, alla maturazione latteo-cerosa (R5, Ritchie et al., 1992). In entrambi i campionamenti sono state prelevate 20 piante dalle file centrali di ogni parcella e, dopo trinciatura, i campioni sono stati essiccati a 105°C. I campioni di biomassa sono stati macinati a 200 µm con un mulino ultracentrifugo Retsch ZM-200 ed analizzati per il contenuto in azoto e carbonio tramite l'analizzatore elementare ThermoQuest NA-1500 N.

L'analisi statistica dei dati è stata effettuata separatamente per anno e per località utilizzando un modello split-split-plot con i seguenti fattori fissi: specie di cover crop, epoca di semina, livello iniziale di azoto nel suolo (solo a Sant'Angelo Lodigiano). Le variabili dipendenti studiate sono state la biomassa aerea (t s.s. ha⁻¹) e l'azoto asportato (kg N ha⁻¹) con la cover crop, le infestanti e la biomassa totale (cover crop + infestanti). Successivamente le medie sono state raggruppate utilizzando il test di Bonferroni. Le analisi statistiche sono state eseguite con il pacchetto nlme versione 3.1-137 (Pinheiro et al., 2019) di R versione 3.5.3 (R Core Team, 2019).

4.3 Risultati e discussione

4.3.1 Avena e segale

Produzione ed asportazione di azoto

Le biomasse di avena e di segale (**Figura 4.1**) sono state simili tra le due colture a Sant'Angelo Lodigiano, con valori del 60% più alti nel 2017 (in media 2.3 t s.s ha⁻¹) rispetto al 2018 (in media 1.4 t s.s ha⁻¹). Le due cover crop hanno asportato in media 60 (anno 2017) e 45 (anno 2018) kg N ha⁻¹ (**Figura 4.2**). Risultati simili sono stati registrati ad Orzinuovi per l'avena che ha prodotto, nei due anni, una media di 2.5 t e 1.5 t s.s. ha⁻¹, corrispondenti rispettivamente a 56 e 32 kg N ha⁻¹. Viceversa, ad Orzinuovi la biomassa di segale è stata in media 1.4 t s.s. ha⁻¹ nel primo anno e praticamente zero nel 2018 (in media 0.2 t s.s. ha⁻¹). Le ridotte produzioni di segale del 2018 sono state

dovute a causa di un consistente attacco di larve del lepidottero crambide *Duponchelia fovealis* Zeller. Il contenimento della flora infestante da parte della cover è stato variabile nelle due località. In entrambi gli anni, a Sant'Angelo Lodigiano, e nel 2017 ad Orzinuovi, la biomassa di infestanti non ha superato il 7-13% della biomassa totale (cover crop + infestante), mentre ad Orzinuovi nel 2018 la percentuale media di infestanti ha rappresentato il 35 e 89% della biomassa totale, rispettivamente nelle tesi con avena e segale. L'irrigazione di soccorso qui eseguita potrebbe aver innescato l'ondata di germinazione in una fase in cui le cover crop avevano ancora un basso grado di copertura del suolo, erano in stress idrico e non hanno espresso un'efficace competizione con la flora infestante. Alla ripresa vegetativa in marzo 2018, la biomassa di segale è incrementata del 30-80% rispetto al campionamento invernale, raggiungendo 3.3-4.0 e 2.1 t s.s. ha⁻¹ rispettivamente a Sant'Angelo Lodigiano e ad Orzinuovi (dati non mostrati nei grafici).

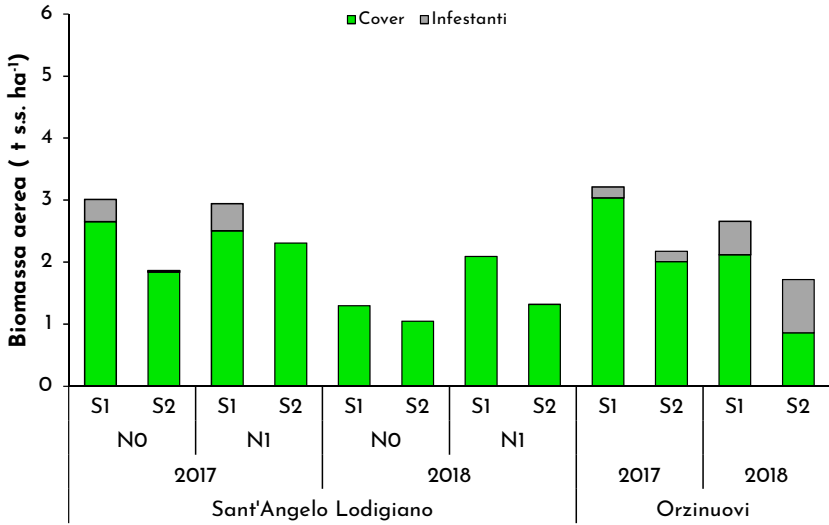
Effetto della data di semina

La segale non ha mostrato decrementi produttivi significativi in seguito alla semina tardiva (S2) mentre l'avena, a Sant'Angelo Lodigiano nel 2017 ed in entrambe le località nel 2018, ha prodotto in media il 40% in meno di biomassa in S2 rispetto a S1 (**Figura 4.1**). Anche la biomassa della flora infestante non è variata in modo significativo tra le due epoche di semina.

Effetto del livello di azoto nel suolo

Nel primo anno di prova, il livello iniziale di azoto nel terreno (NO vs N1) non ha determinato variazioni significative di biomassa ed asportazione di azoto nelle due tesi (**Figure 4.3 e 4.4**). Viceversa nel secondo anno di prova, limitatamente a S1, entrambe le specie hanno risposto positivamente al livello iniziale di azoto nel suolo (+60-70% di peso secco e +65-83% di azoto asportato rispettivamente dall'avena e dalla segale) e, poiché le infestanti erano praticamente assenti, l'effetto è stato significativo anche per la sola cover crop (**Figure 4.3 e 4.4**).

Avena



Segale

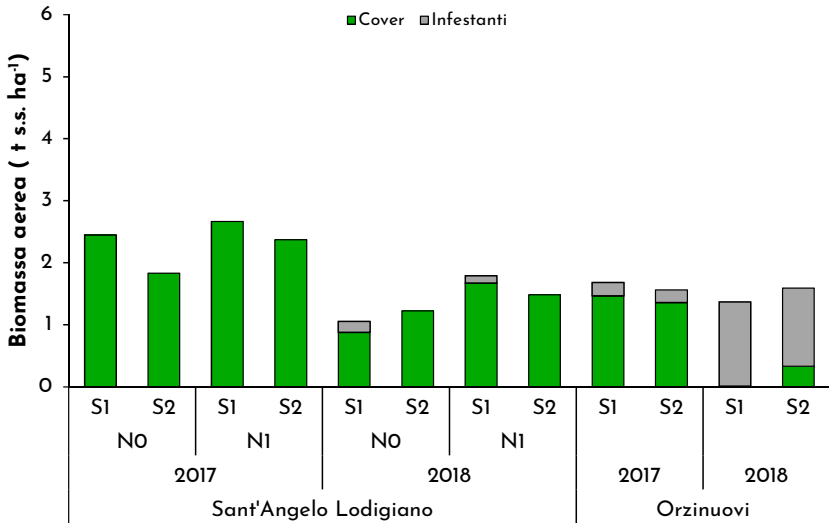
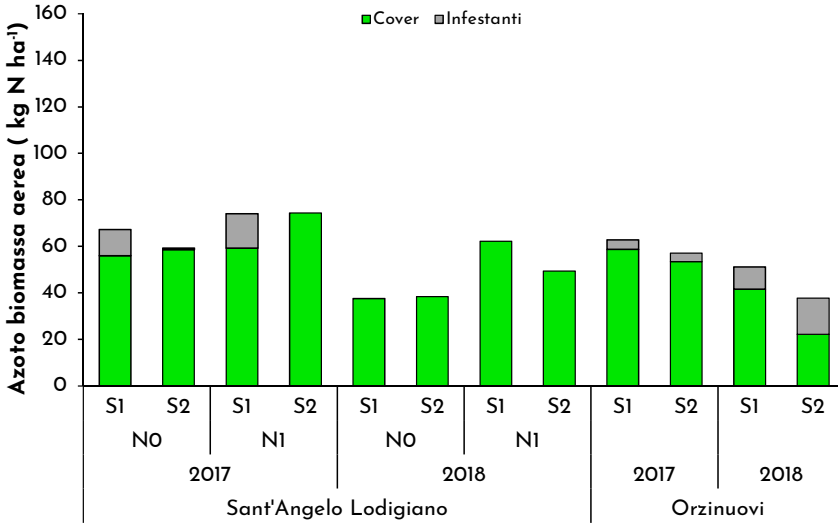


Figura 4.1 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di avena e di segale misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

Avena



Segale

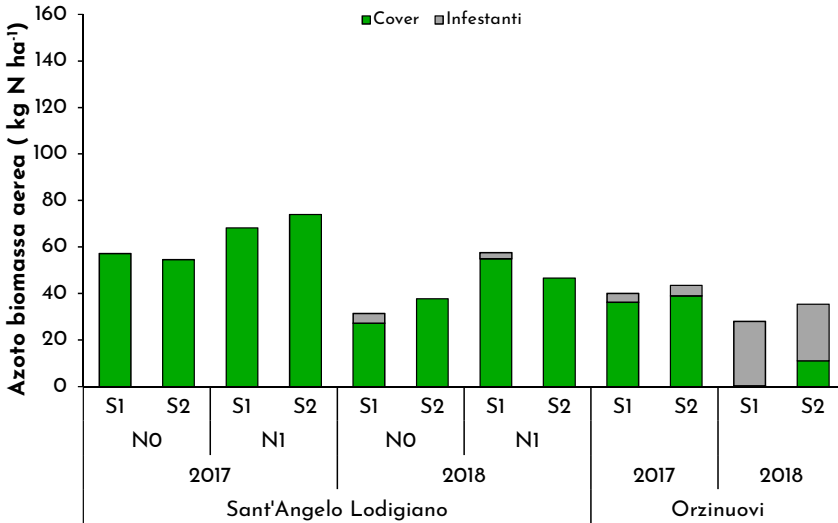
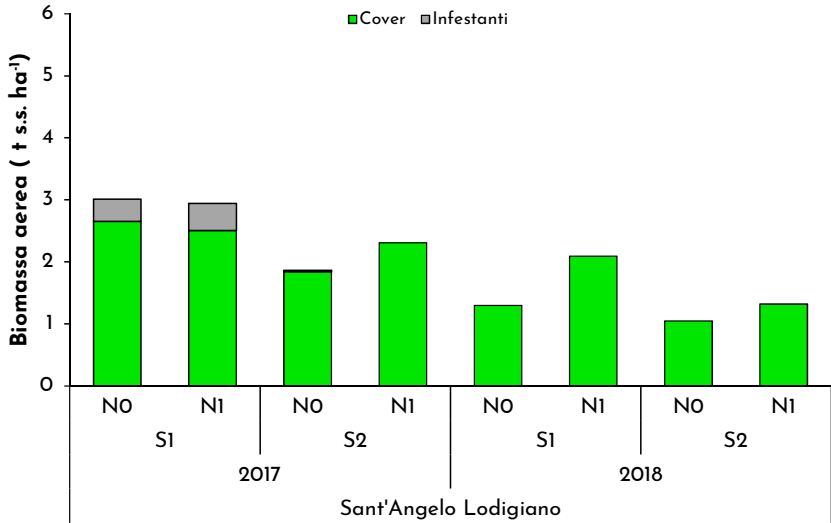


Figura 4.2 Asportazione di azoto (kg N ha^{-1}) con la biomassa aerea di avena e di segale misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

Avena



Segale

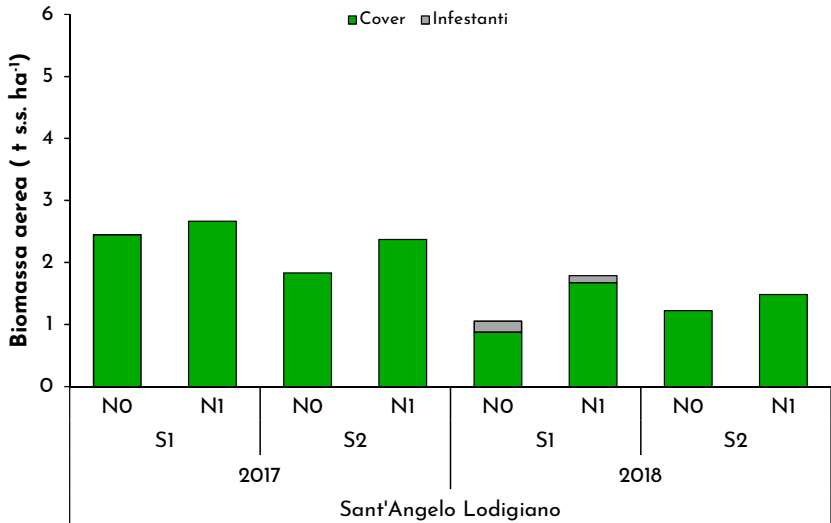
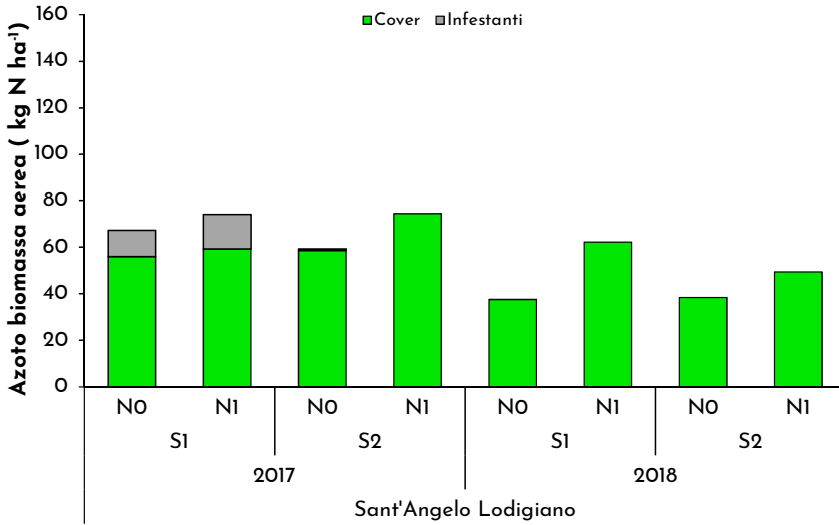


Figura 4.3 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di avena e di segale misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

Avena



Segale

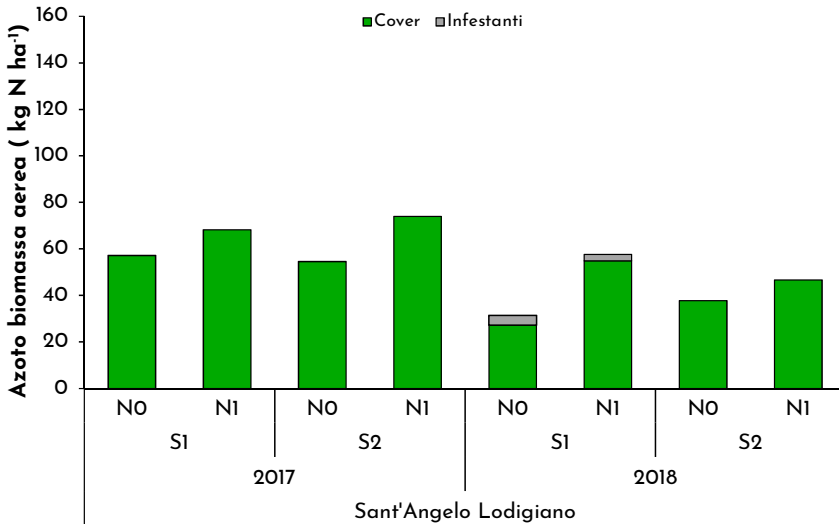


Figura 4.4 Asportazione di azoto (kg N ha⁻¹) con la biomassa aerea di avena e di segale misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

4.3.2 Trifoglio e veccia

Produzione ed asportazione di azoto

La biomassa aerea di trifoglio in entrambi gli anni di prova a Sant'Angelo Lodigiano non ha superato in media la tonnellata per ettaro (0.9 e 0.8 t s.s. ha^{-1}), mentre la veccia ha prodotto in media circa il doppio (1.6 e 1.3 t s.s. ha^{-1}) (**Figura 4.5**). Le rispettive asportazioni di azoto sono state di circa 30 kg N ha^{-1} per il trifoglio e 60 - 54 kg N ha^{-1} per la veccia (**Figura 4.6**). Nel primo anno di prova, la flora infestante nelle tesi seminate in S1 ha costituito una quota rilevante della biomassa totale (in media fino al 36% e 24% del peso secco per trifoglio e veccia). Nelle tesi seminate in S2, e in tutte le tesi nel 2018, la presenza della flora infestante è stata modesta (in media <3% del peso secco), verosimilmente a causa della scarsa disponibilità di acqua nello strato più superficiale del suolo trovata nel periodo successivo alla semina. Quest'ipotesi trova conferma nell'assenza di flora infestante anche nel testimone non diserbato. I risultati ottenuti ad Orzinuovi per il trifoglio sono stati simili a quelli di Sant'Angelo Lodigiano, con biomasse medie di circa 1.0 t s.s. ha^{-1} ed asportazioni di azoto medie di 30 kg N ha^{-1} . La veccia ha prodotto in media circa due t s.s. ha^{-1} nel 2017 e circa la metà nell'anno seguente (0.9 t s.s. ha^{-1}), a cui corrispondono rispettivamente 85 e 34 kg N ha^{-1} . In entrambi gli anni le infestanti hanno rappresentato una quota considerevole della biomassa totale, con valori medi fino al 43-60% del peso secco per il trifoglio e del 15-46% per la veccia. A differenza della segale, la veccia non ha mostrato incrementi produttivi alla ripresa vegetativa poiché la neve ha determinato la morte della biomassa aerea presente durante l'inverno (dati non mostrati nei grafici).

Effetto della data di semina

L'effetto della data di semina sulla produzione e sull'asportazione di azoto è stato marcato a Sant'Angelo Lodigiano (**Figure 4.5 e 4.6**). I decrementi produttivi medi di biomassa totale (cover crop + infestanti) sono stati di 80-91% del peso secco per trifoglio e di 56-78% per la veccia in S2 rispetto a S1. Le minori rese di biomassa totale in S2 nel 2017 sono state dovute anche ad una minor presenza di infestanti nelle tesi seminate nella terza settimana di settembre rispetto a quelle seminate ad inizio settembre.

Viceversa, nel 2018 le infestanti erano praticamente assenti e le differenze osservate sono state dovute ad una variazione considerevole della biomassa della cover crop. Nella prova di Orzinuovi l'effetto della data di semina sulla produzione e sull'asportazione di azoto (**Figure 4.5 e 4.6**) è stato contenuto e significativo soltanto per la biomassa totale e la cover crop di vecchia nel 2017 (rispettivamente -43% e -50% di peso secco) e la sola cover di trifoglio nel 2018 (-80% di peso secco).

Effetto del livello di N nel suolo

In entrambi gli anni, il trifoglio e la vecchia seminate ad inizio settembre (S1) hanno risposto significativamente al livello iniziale di azoto nel terreno, registrando produzioni di biomassa totale più alte del 34-40%, per il trifoglio, e del 25-35% per la vecchia in condizioni di maggior disponibilità di azoto (N1) (**Figure 4.7 e 4.8**). Nel secondo anno di prova anche la sola cover crop ha mostrato un incremento produttivo significativo in N1 rispetto a N0. Diversamente dalla biomassa, l'azoto asportato è stato significativamente più alto nei due anni soltanto nella totalità della biomassa (+37-39%) e nella cover crop (+38-65%) di vecchia (**Figure 4.7 e 4.8**).

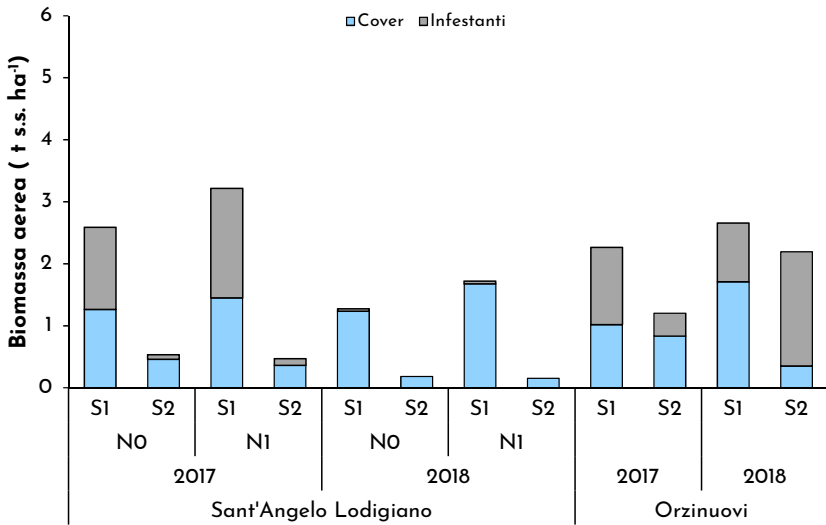
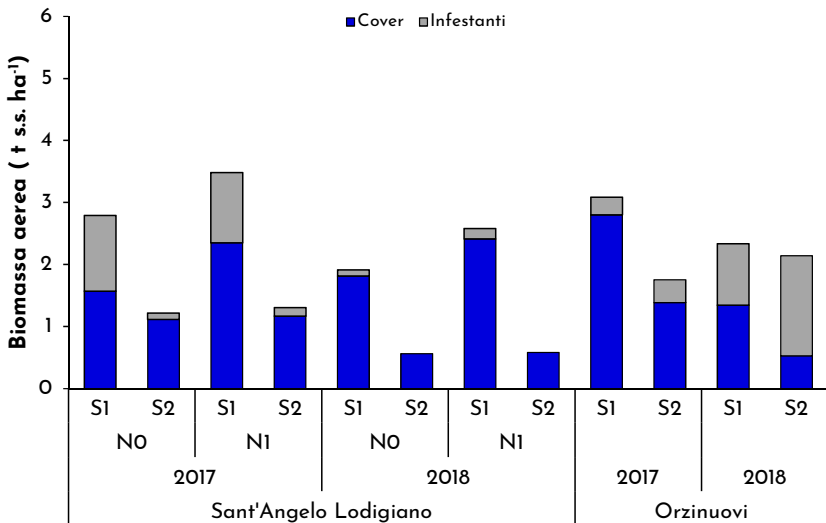
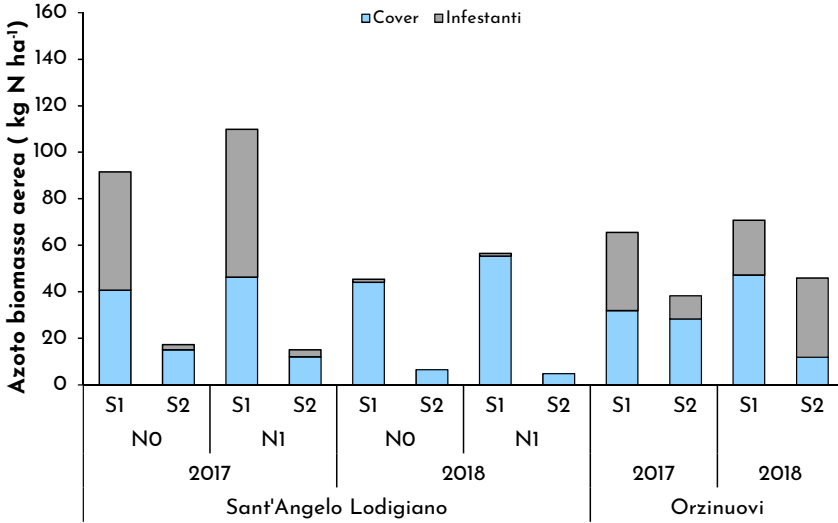
Trifoglio**Veccia**

Figura 4.5 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di trifoglio e di veccia misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

Trifoglio



Veccia

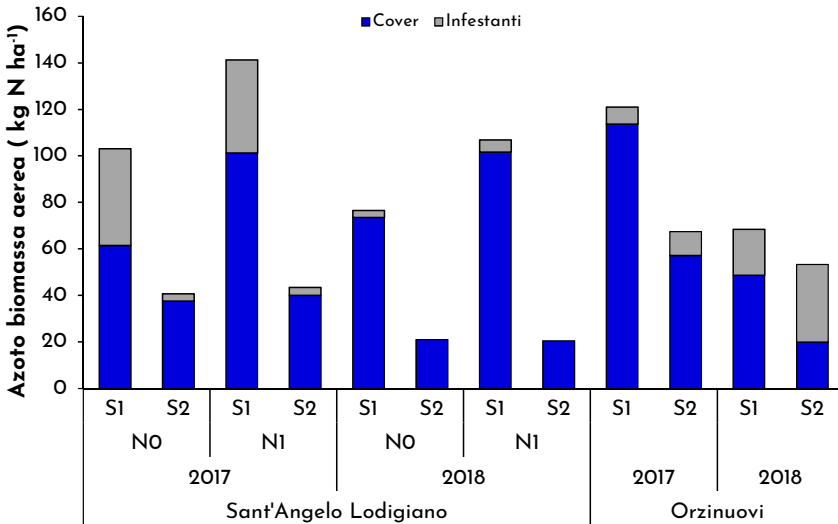


Figura 4.6 Asportazione di azoto (kg N ha⁻¹) con la biomassa aerea di trifoglio e di veccia misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

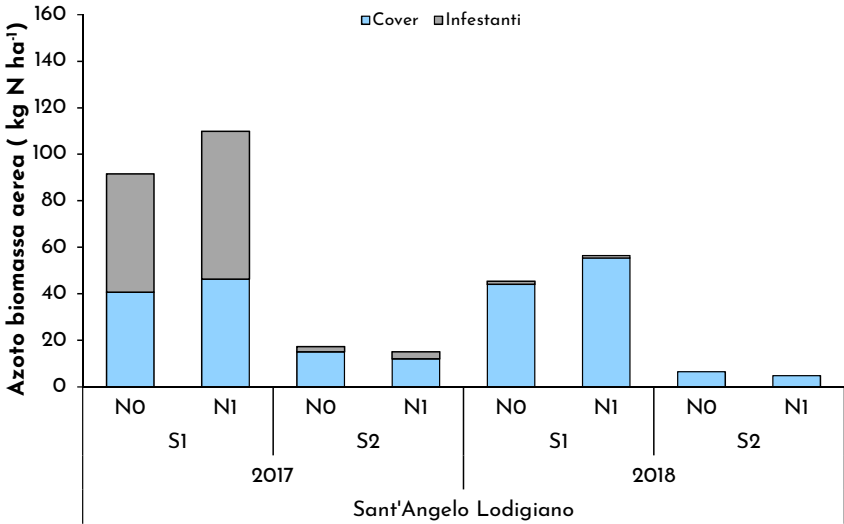
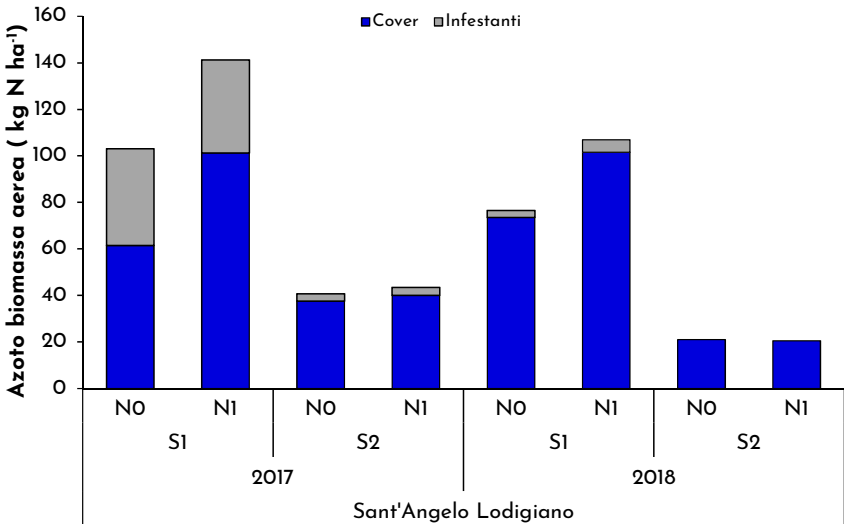
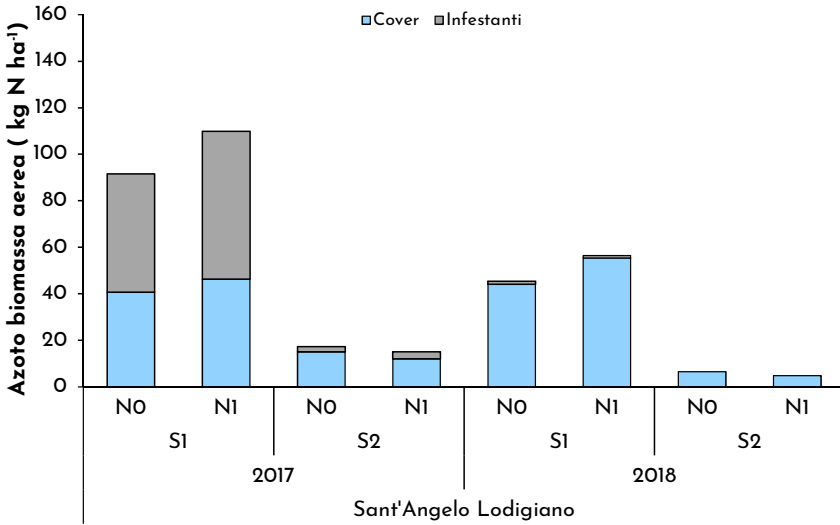
Trifoglio**Veccia**

Figura 4.7 Biomassa aerea secca ($t\ s.s.\ ha^{-1}$) di trifoglio e di veccia misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

Trifoglio



Veccia

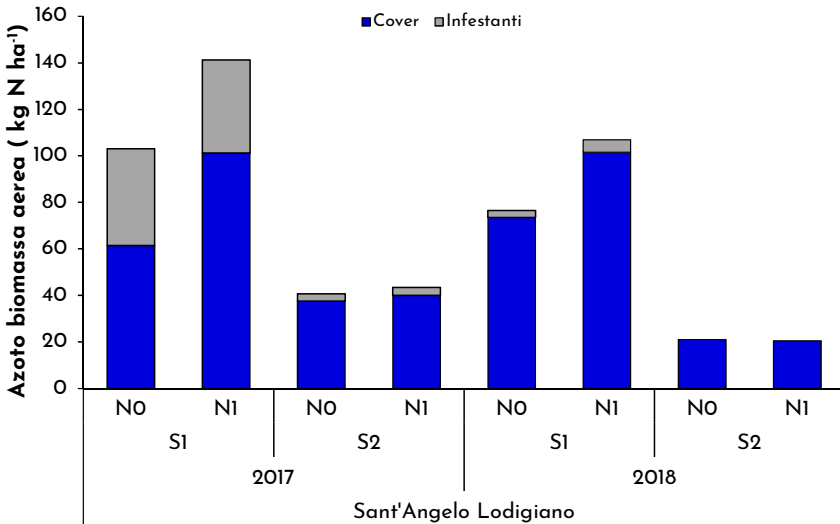


Figura 4.8 Asportazione di azoto (kg N ha⁻¹) con la biomassa aerea di trifoglio e di veccia misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

4.3.3 Senape

Le biomasse e le asportazioni di azoto della senape (**Figure 4.9 e 4.10**) sono state simili nelle due località, con produzioni ed asportazioni medie più elevate nel 2017 (3.6-4.2 t s.s. ha⁻¹ e 86-100 kg N ha⁻¹) rispetto al 2018 (1.7-2.2 t s.s. ha⁻¹ e 46-51 kg N ha⁻¹). La crescita della senape ha contenuto completamente la flora infestante in entrambi gli anni a Sant'Angelo Lodigiano e nel 2017 ad Orzinuovi, indipendentemente dall'epoca di semina e dal livello di azoto iniziale del suolo. Viceversa nel secondo anno ad Orzinuovi il 28% della biomassa totale era costituito da flora infestante.

Effetto della data di semina

La semina di fine settembre (S2) ha determinato una riduzione significativa del 30-40% di biomassa aerea totale e della cover crop in entrambe le località nel 2017 e nel 2018 ad esclusione di NO a Sant'Angelo Lodigiano (**Figura 4.9**). Poiché le infestanti hanno contribuito in modo marginale alla biomassa totale, le variazioni di biomassa sono dovute quasi esclusivamente alla cover crop. Diversamente dalla biomassa, l'azoto asportato dalla biomassa totale e dalla cover crop non è variato significativamente tra S1 e S2, ad eccezione della prova ad Orzinuovi nel 2018 dove la cover crop di senape ha asportato di più in S1 che in S2 (**Figura 4.10**).

Effetto del livello di N nel suolo

La senape ha risposto in modo significativo alla disponibilità di azoto inizialmente presente nel suolo, con produzioni ed asportazioni di azoto significativamente più elevate (+40-138% del peso secco e +25-98% dell'azoto asportato) in N1 rispetto a NO (**Figure 4.11 e 4.12**).

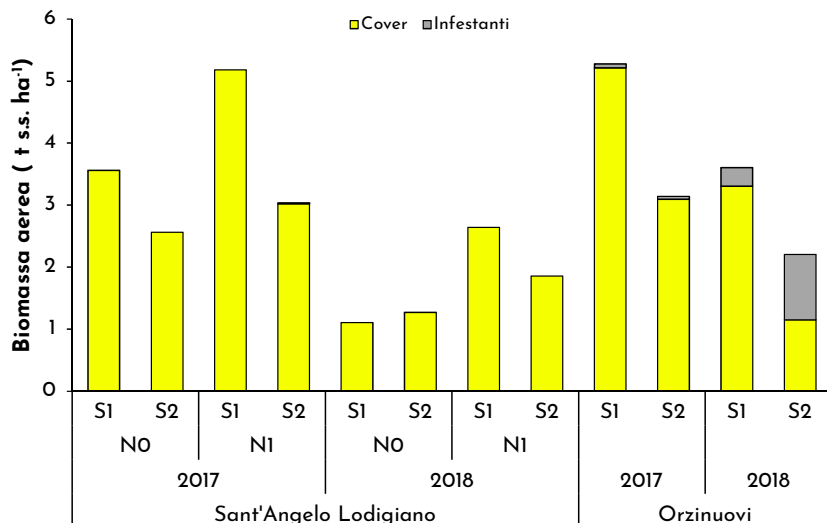


Figura 4.9 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di senape misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

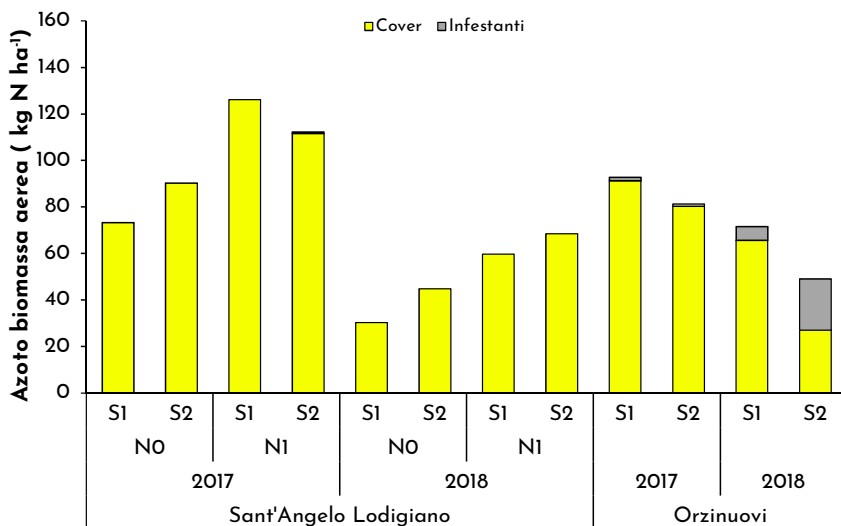


Figura 4.10 Asportazione di azoto (kg N ha⁻¹) con la biomassa aerea di senape misurata nelle due località e nei due anni in funzione dell'epoca di semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

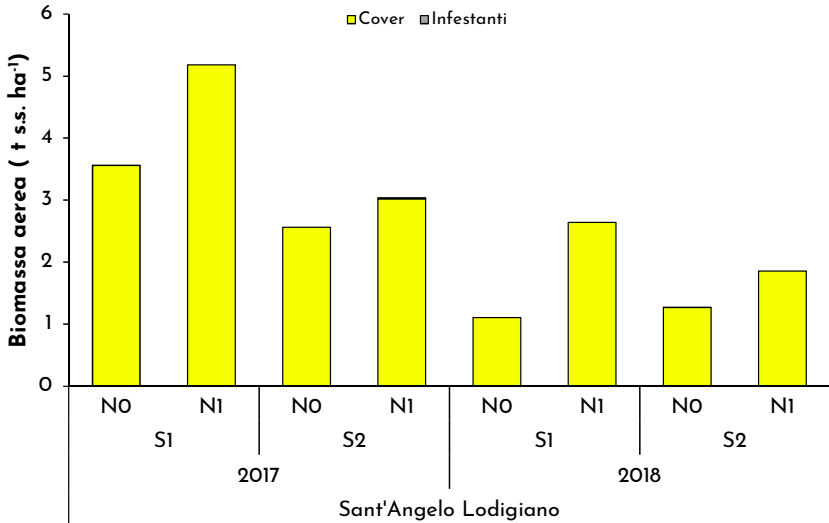


Figura 4.11 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di senape misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti.

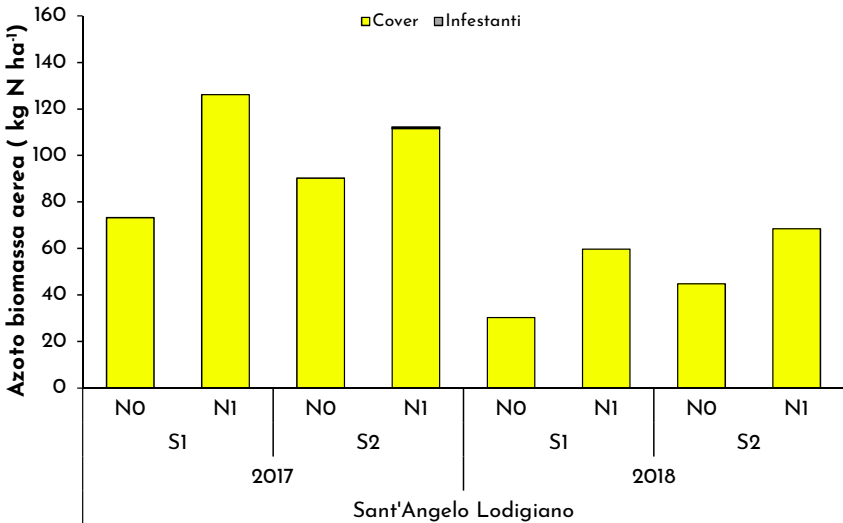
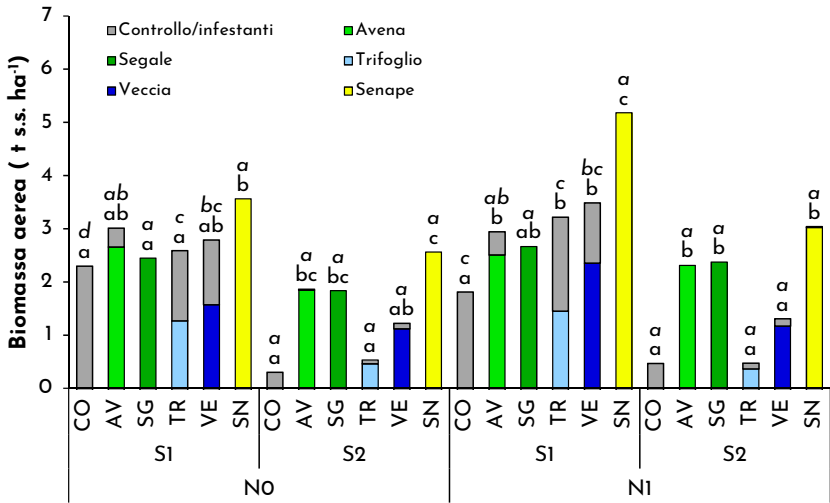


Figura 4.12 Asportazione di azoto (kg N ha⁻¹) con la biomassa aerea di senape misurata a Sant'Angelo Lodigiano nei due anni in funzione della concentrazione di azoto nel suolo alla semina. L'asportazione totale è costituita dall'azoto asportato dalla cover crop e dalle infestanti.

4.3.4 Performance delle cover crop a confronto

I risultati ottenuti nelle due prove non evidenziano un unico trend produttivo poiché sia l'accumulo di biomassa aerea totale (cover crop + infestanti) che l'asportazione di azoto dipendono dalla data di semina e dalla disponibilità iniziale di azoto nel terreno (vedere i paragrafi precedenti). In generale, la semina ad inizio settembre (S1) ha determinato performance produttive simili nelle diverse tesi, con valori talvolta significativamente superiori per la senape, soprattutto nel 2017 (**Figure 4.13 e 4.14**). In termini di asportazione totale di azoto (cover crop + infestanti) invece la vecchia eguaglia la senape nel 2017, superandone significativamente le asportazioni a Sant'Angelo Lodigiano nel secondo anno (**Figure 4.15 e 4.16**). Viceversa, in seguito alla semina più tardiva (S2), la senape, l'avena e la segale presentano produzioni ed asportazioni totali spesso non significativamente diverse tra loro, mentre entrambe le leguminose mostrano un drastico calo produttivo. Infine, i risultati di questi due anni di prova evidenziano che in condizioni ambientali favorevoli alla germinazione della flora spontanea, quest'ultima può contribuire in modo sostanziale alla biomassa totale prodotta nelle tesi con cover crop. Infatti, l'inerbimento spontaneo può produrre anch'esso una considerevole quantità di biomassa ed asportare azoto in quantità simili alle cover crop. Viceversa, in condizioni sfavorevoli alla germinazione e alla crescita delle infestanti, le cover crop hanno comunque una maggior capacità di crescita e di asportare azoto rispetto all'inerbimento spontaneo grazie al vantaggio derivante dalla favorevole collocazione dei semi realizzata al momento della semina.

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

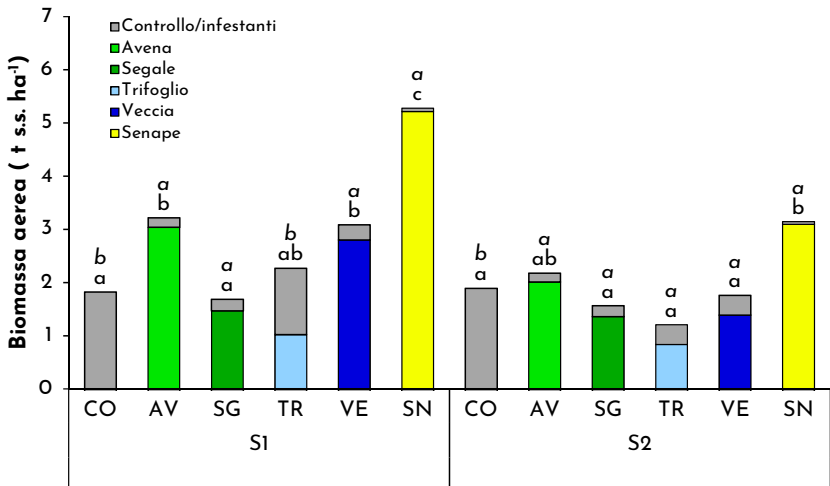
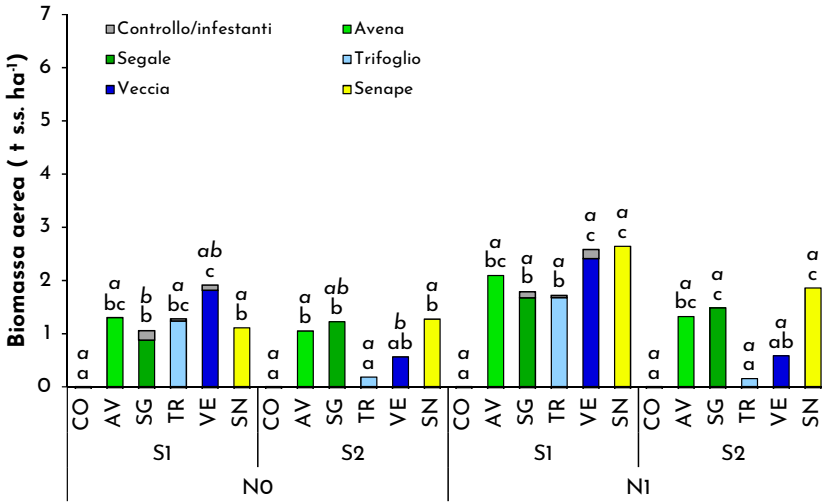


Figura 4.13 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di cover crop misurata nelle due località a novembre 2017. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (NO e N1), differenze significative tra la biomassa totale (lettere in stampatello) e la biomassa delle infestanti (lettere in corsivo).

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

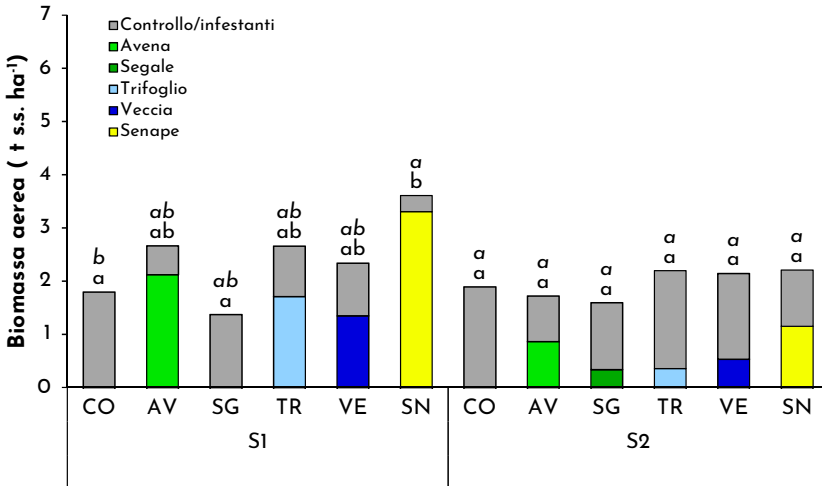
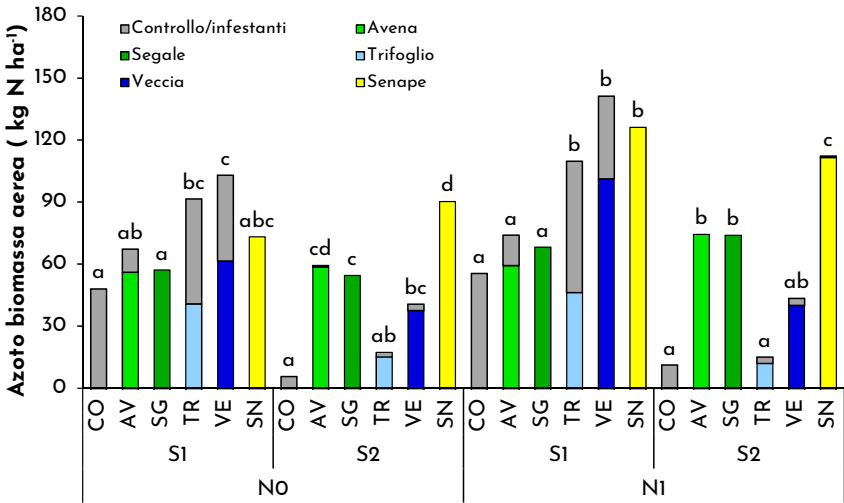


Figura 4.14 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) di cover crop misurata nelle due località a novembre 2018. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (N0 e N1), differenze significative tra la biomassa totale (lettere in stampatello) e la biomassa delle infestanti (lettere in corsivo).

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

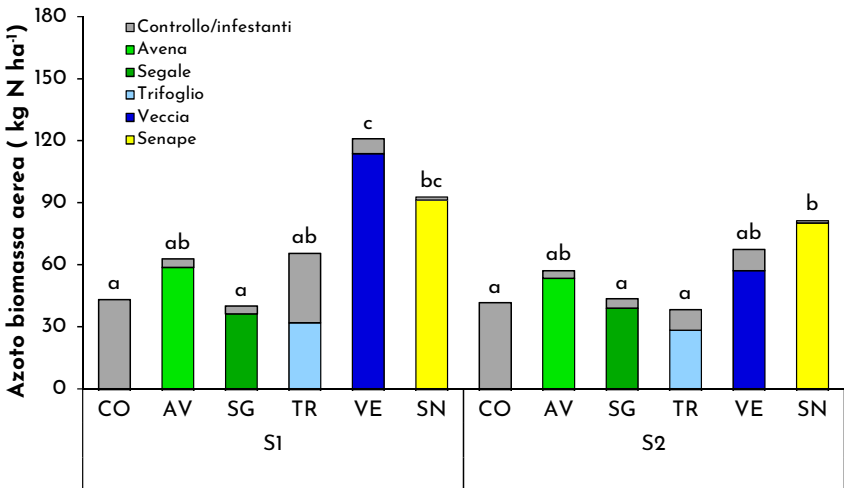
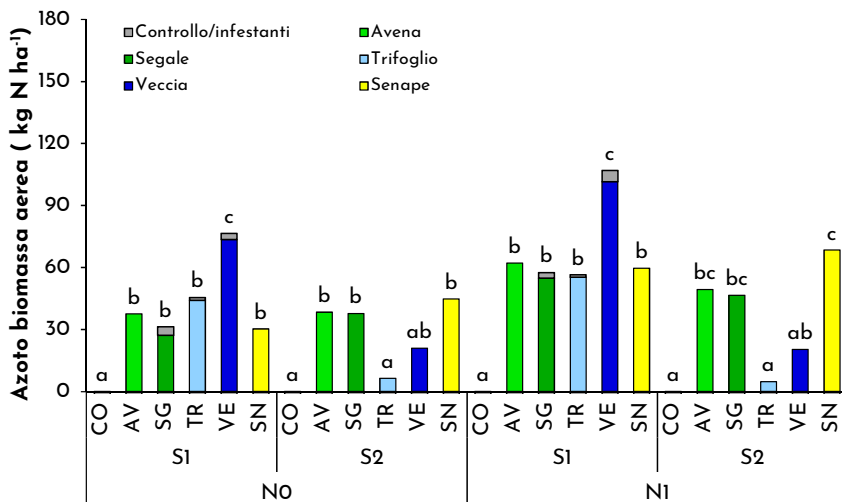


Figura 4.15 Asportazione di azoto (kg N ha^{-1}) con la biomassa aerea di cover crop misurata nelle due località da novembre 2017. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (NO e N1), differenze significative tra l'asportazione totale nelle diverse tesi.

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

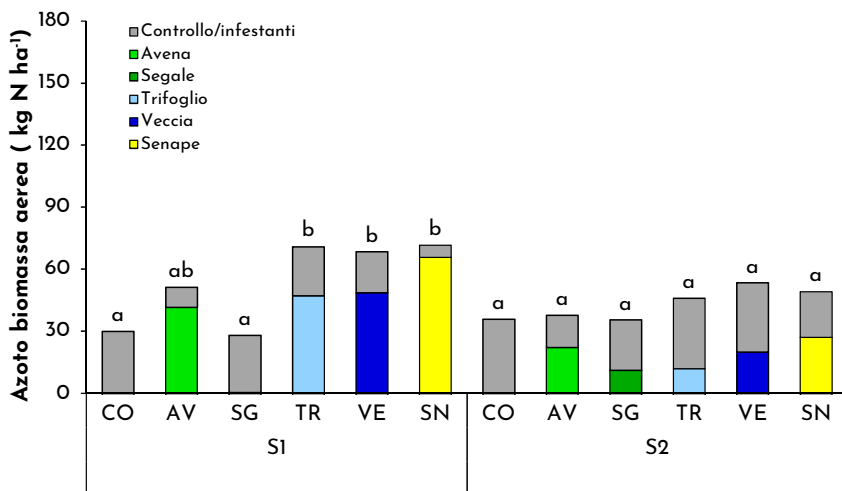


Figura 4.16 Asportazione di azoto (kg N ha^{-1}) con la biomassa aerea di cover crop misurata nelle due località a novembre 2018. La biomassa totale è costituita dalla cover crop e dalle infestanti. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (N0 e N1), differenze significative tra l'asportazione totale nelle diverse tesi.

Le cover crop e l'inerbimento spontaneo costituiscono un mezzo per ridurre parte dell'inquinamento ambientale dovuto alla concimazione azotata. Infatti, l'azoto asportato rappresenta una quota dell'azoto minerale presente nel suolo che potrebbe essere soggetto a perdite per lisciviazione. Nel periodo autunnale-primaverile, dove le precipitazioni sono elevate, se il suolo è privo di coltura, le perdite per lisciviazione possono essere considerevoli (Webb et al., 2013). Inoltre l'azoto asportato dalle cover crop e dalla flora infestante può essere disponibile alla coltura in successione in seguito alla decomposizione della sostanza organica dei residui. Tuttavia, l'effettiva disponibilità dell'azoto dipende in gran parte dalla composizione del substrato (es. contenuto in azoto e lignina). Una variabile guida utile per ipotizzare il destino dell'azoto dei residui è il loro rapporto carbonio azoto (C/N). I microrganismi del suolo hanno una composizione relativamente costante in termini di carbonio e azoto (C/N medio di 4-10 g C g N⁻¹; Xu et al., 2013), a differenza dei residui vegetali che presentano un'ampia variabilità (da C/N < 10 nel caso di foglie giovani a C/N > 100 nel caso della paglia dei cereali). Durante la decomposizione di residui con un contenuto in azoto superiore alla quantità richiesta dai microrganismi (C/N < 20-30 circa), l'azoto organico in eccesso viene rilasciato nel suolo come azoto ammoniacale (mineralizzazione) ed è disponibile per la pianta. Viceversa, durante la decomposizione di residui poveri in azoto (con C/N > 20-30 circa) i microrganismi immobilizzano, se presente, azoto minerale del terreno, rendendolo temporaneamente indisponibile alla coltura (immobilizzazione). I rapporti C/N delle diverse cover crop e della flora infestante (**Tabella 4.2**) mostrano valori raramente superiori al 20, e fanno quindi ipotizzare un rilascio netto di azoto durante la decomposizione nel suolo delle cover crop e delle infestanti (**Figura 4.17**).

Tabella 2 Rapporto C/N delle cover crop e della flora spontanea (deviazione standard in parentesi).

Cover crop	Azoto nel suolo	Epoca di semina	Sant'Angelo Lodigiano		Orzinuovi	
			20/11/2017	14/11/2018	22/11/2017	22/11/2018
Avena	NO	S1	20,5 (2,6)	14,3 (0,7)	22,1 (2,3)	21,4 (1,9)
		S2	13,5 (1,1)	11,5 (0,9)	16,0 (0,6)	15,5 (0,6)
	NI	S1	18,0 (0,9)	13,8 (1,2)	n.d.	n.d.
		S2	13,3 (2,2)	10,9 (1,9)	n.d.	n.d.
Segale	NO	S1	18,5 (2,0)	10,7 (0,9)	17,2 (0,5)	12,4 (1,9)
		S2	14,2 (0,8)	11,3 (0,4)	15,1 (1,0)	11,3 (0,6)
	NI	S1	17,2 (3,5)	11,3 (1,5)	n.d.	n.d.
		S2	13,6 (1,3)	11,2 (0,6)	n.d.	n.d.
Trifoglio	NO	S1	13,5 (0,4)	10,9 (1,0)	13,6 (0,6)	15,0 (0,9)
		S2	11,3 (0,7)	9,5 (0,3)	12,3 (0,5)	12,4 (1,5)
	NI	S1	13,5 (0,4)	11,4 (0,8)	n.d.	n.d.
		S2	11,8 (0,5)	9,4 (0,3)	n.d.	n.d.
Veccia	NO	S1	10,9 (0,5)	9,1 (0,2)	10,6 (0,4)	10,0 (0,5)
		S2	10,5 (0,4)	8,6 (0,4)	10,1 (0,2)	10,2 (1,0)
	NI	S1	10,1 (0,5)	8,9 (0,4)	n.d.	n.d.
		S2	10,6 (0,8)	9,1 (0,5)	n.d.	n.d.
Senape	NO	S1	20,3 (2,3)	14,5 (1,7)	23,4 (0,6)	21,0 (2,6)
		S2	11,2 (1,7)	11,4 (1,2)	15,9 (1,6)	17,1 (1,0)
	NI	S1	17,4 (2,6)	18,0 (2,6)	n.d.	n.d.
		S2	10,8 (2,3)	10,6 (1,0)	n.d.	n.d.
Infestanti	Media	Media	11,2 (1,9)	11,5 (2,3)	16,7 (2,8)	19,8 (3,8)

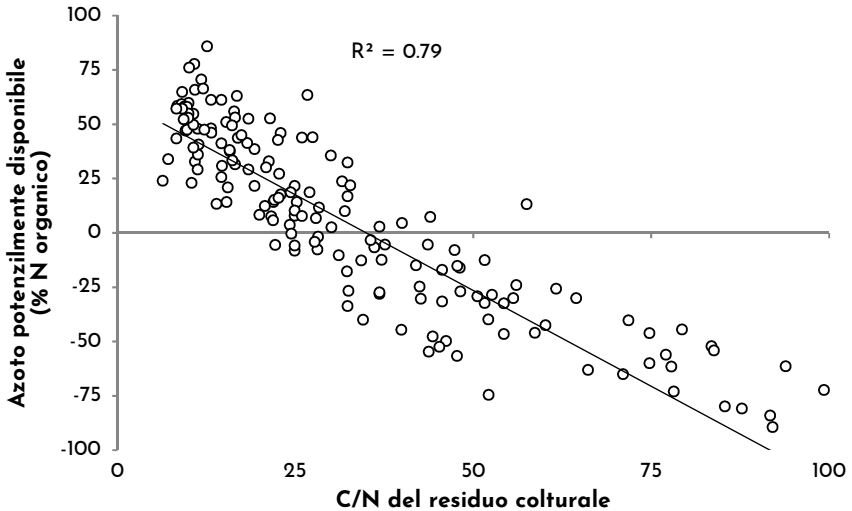
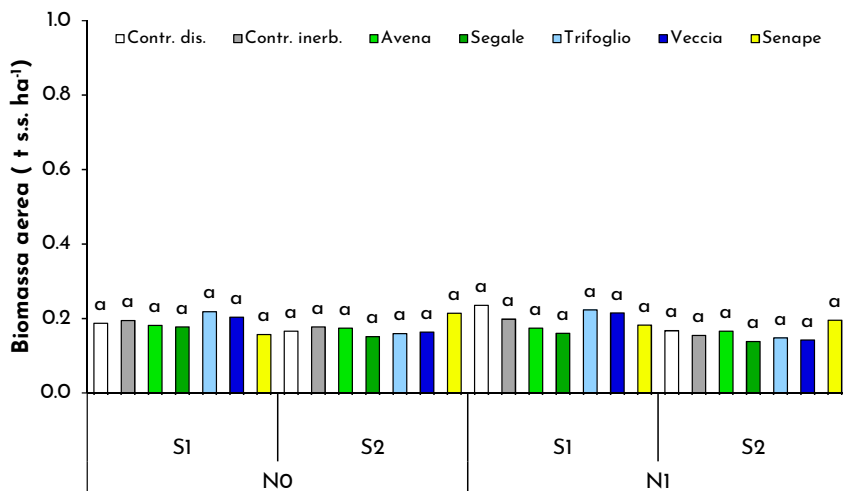


Figura 4.17. Relazione empirica tra il rapporto C/N dei residui vegetali e l'azoto potenzialmente disponibile per la coltura (% dell'azoto organico applicato). I dati provengono dalle seguenti fonti bibliografiche: De Neve et al. (1996), Jensen et al. (2005), Redin et al. (2014) e Trinsoutrot et al. (2000).

4.3.5 Valore fertilizzante delle cover crop

In entrambe le località, allo stadio vegetativo di sesta foglia (V6) il mais non ha mostrato differenze significative tra le diverse tesi (**Figura 4.18**) nonostante l'azoto apportato al suolo con i residui vegetali fosse significativamente superiore per alcune cover crop rispetto ad altre (**Figura 4.15**). Tuttavia, negli stadi precoci di sviluppo del mais (V1-V6), le esigenze colturali sono limitate e spesso pienamente soddisfatte dall'azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica del suolo che rende difficile la manifestazione dell'effetto di diverse tesi di fertilizzazione (Cavalli et al., 2016). Inoltre, la concimazione azotata effettuata in presemina al mais (circa 25 kg N ha⁻¹) può aver ulteriormente contribuito a livellare i livelli produttivi. In corrispondenza della raccolta, allo stadio fenologico della maturazione latteo-cerosa (R5), il mais ha mostrato rese ed asportazioni di azoto statisticamente differenti nelle diverse tesi soltanto ad Orzinuovi (**Figure 4.19 e 4.20**) mentre a Sant'Angelo Lodigiano il mais ha prodotto in media 21.5 t s.s. ha⁻¹ (**Figura 4.19**) ed ha asportato 233 kg N ha⁻¹ (**Figura 4.20**) indipendentemente dal trattamento

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

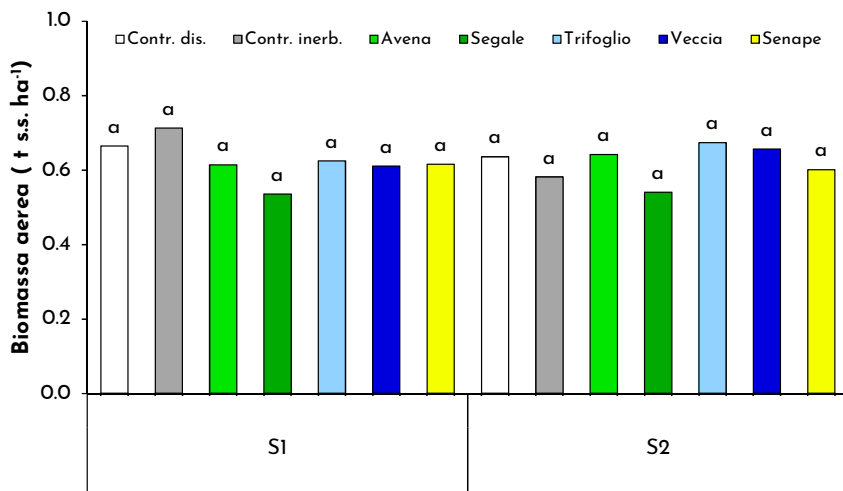
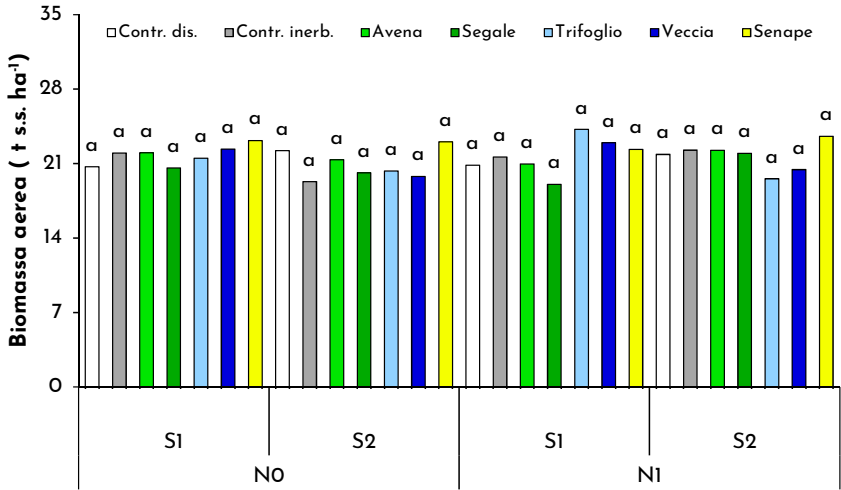


Figura 4.18 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) del mais allo stadio fenologico di sesta foglia (V6; Ritchie et al., 1992) misurata nelle due località. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (NO e NI), differenze significative tra le medie.

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

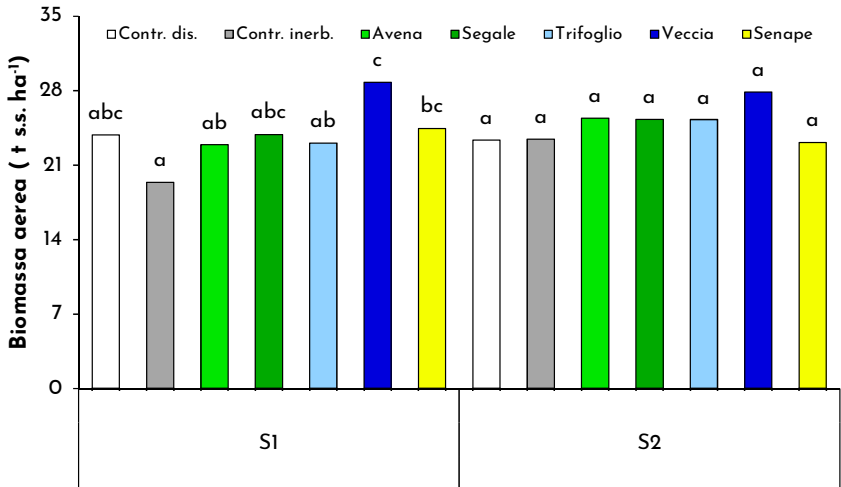
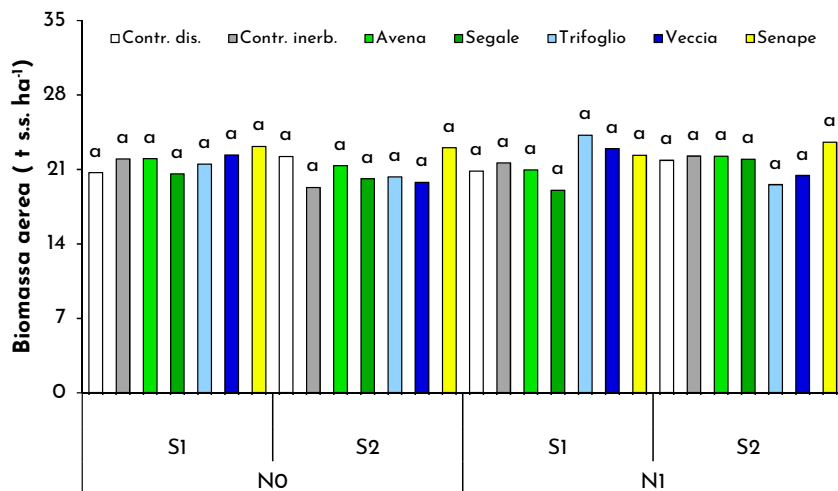


Figura 4.19 Biomassa aerea secca (t s.s. ha⁻¹) del mais alla maturazione latteocerosa (R5; Ritchie et al., 1992) misurata nelle due località. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (NO e N1), differenze significative tra le medie.

Sant'Angelo Lodigiano



Orzinuovi

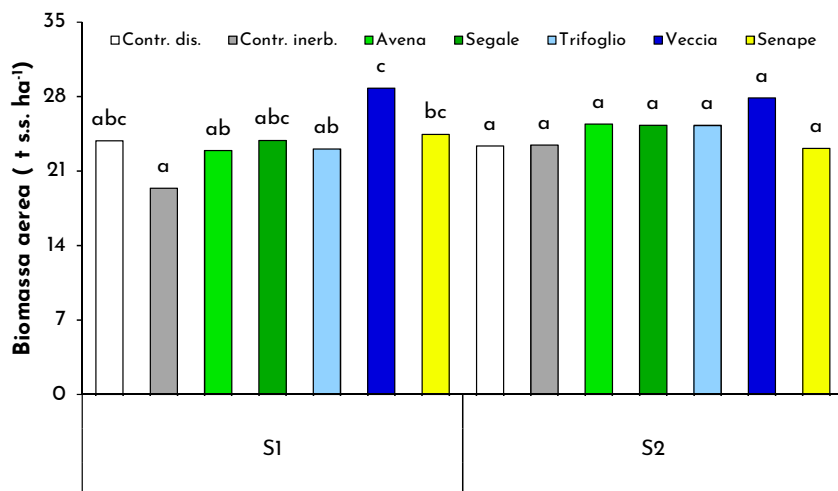


Figura 4.20 Asportazione di azoto (kg N ha^{-1}) con la biomassa aerea del mais alla maturazione latteo-cerosa (R5; Ritchie et al., 1992) misurata nelle due località. Lettere diverse indicano, per ogni epoca di semina (S1 e S2) e concentrazione di azoto alla semina (NO e N1), differenze significative tra le medie.

applicato. Viceversa, ad Orzinuovi, le rese e le asportazioni di azoto sono state maggiori, limitatamente alle tesi S1, dopo vecchia ($28.8 \text{ t s.s. ha}^{-1}$ e 267 kg N ha^{-1}) rispetto alla precessione di controllo inerbito, avena ed trifoglio (in media $21.8 \text{ t s.s ha}^{-1}$), per quanto riguarda la biomassa aerea (**Figura 4.19**), e a tutte le altre tesi (in media 195 kg N ha^{-1}), per quanto riguarda l'asportazione di azoto (**Figura 4.20**). Rese ed asportazioni di azoto maggiori ($+5 \text{ t s.s. ha}^{-1}$ e $+72 \text{ kg N ha}^{-1}$) sono state registrate anche nelle tesi con senape di prima semina (S1) rispetto al controllo inerbito. Le differenze tra le diverse tesi di cover crop seminate in S2 sono state più modeste, e significativamente più alte soltanto nel caso della vecchia, che ha asportato più azoto (253 kg N ha^{-1}) rispetto ad entrambi i controlli e alla senape (in media 188 kg N ha^{-1}).

La ridotta risposta del mais all'azoto apportato con le cover crop può essere dovuta a più fattori. La concimazione minerale è stata definita in modo tale da non determinare un consumo di lusso (Quemada et al., 2013; Schröder et al., 2016) e quindi ricadere in una zona in cui il mais risponde positivamente alla fertilizzazione azotata, sia in termini di biomassa che di asportazione di azoto (Zavattaro et al., 2012). Tuttavia, entrambi i siti hanno mostrato un'elevata fertilità residua del suolo, come suggerito dalle rese ottenute nei controlli senza cover crop (in particolare quello diserbato durante il periodo invernale) che hanno prodotto $19.4\text{-}23.9 \text{ t ha}^{-1}$ ed asportato azoto per $153\text{-}194 \text{ kg N ha}^{-1}$ (**Figura 4.19 e 4.20**). Inoltre, sebbene l'azoto apportato con le diverse cover crop sia in buona parte mineralizzato e potenzialmente disponibile alla coltura in successione (**Figura 4.17**), le quantità apportate sono state spesso modeste (**Figura 4.15**), soprattutto se si considera che circa il 50-70% (Webb et al., 2013) dell'azoto minerale del suolo può non essere accessibile alla coltura perché perso o ri-organizzato dai microrganismi del suolo. Tuttavia l'effetto fertilizzante delle matrici organiche (come gli effluenti zootecnici e i residui colturali) non si esplica in una sola stagione colturale poiché l'azoto organico residuo (cioè quello non mineralizzato durante la stagione colturale e quello minerale immobilizzato dai microrganismi) si accumula nel suolo e costituisce un pool di sostanza organica che contribuisce alla fertilizzazione azotata nel lungo periodo (Webb et al., 2013). Per questo motivo, una quantificazione robusta del valore fertilizzante dei concimi organici richiede una valutazione ripetuta negli anni per tenere in considerazione la variabilità inter-annuale e il contributo dell'azoto residuo. Inoltre, è plausibile che negli anni a seguire, la fertilità residua iniziale del suolo diminuisca, e

quindi le differenze tra le diverse tesi siano maggiormente enfatizzate, grazie anche al contributo degli apporti precedenti di azoto organico con le cover crop (Cavalli et al., 2016; Webb et al., 2013).

4.4 Conclusioni

I risultati delle due prove mostrano come le diverse cover crop, se opportunamente gestite, siano in grado di apportare biomassa e di asportare azoto in quantità interessanti da un punto di vista agronomico. In particolare, rese soddisfacenti si ottengono per le due graminacee e la senape indipendentemente dall'epoca di semina, mentre per le leguminose (veccia e trifoglio) soltanto a seguito di una semina precoce (S1) poiché la semina tardiva (S2) non ha permesso alla coltura di crescere in modo ottimale. Per tutte le cover crop è comunque preferibile una semina anticipata per massimizzare l'assorbimento di azoto minerale presente nel terreno alla raccolta del mais e limitare il più possibile le perdite potenziali di azoto per lisciviazione. Le diverse specie, ad eccezione del trifoglio, hanno mostrato una buona capacità competitiva nei confronti della flora spontanea. A questo proposito si sottolinea il fatto che, sebbene la flora spontanea, quando in grado di germinare e crescere, abbia raggiunto livelli produttivi paragonabili ad alcune cover crop, queste ultime sono da preferire da un punto di vista agronomico ed ambientale (asportazione di azoto potenzialmente lisciviabile) poiché attraverso la collocazione ottimale del seme le cover crop crescono anche in condizioni nelle quali le piante spontanee non sono in grado di vegetare. La breve durata delle due prove di campo non ha permesso di formulare conclusioni robuste sul valore fertilizzante delle cover crop. Tuttavia i dati compositivi (contenuto in azoto e rapporto C/N), integrati con le informazioni disponibili in letteratura, suggeriscono che l'azoto delle cover crop contribuisce in modo positivo alla nutrizione azotata del mais. Le due prove agronomiche descritte in precedenza hanno valutato solo alcuni aspetti riguardanti le cover crop, mentre una loro completa valutazione richiederebbe l'integrazione con i risultati di letteratura. Infatti, la coltivazione delle cover crop può influenzare altre proprietà chimico-fisiche e biologiche del suolo (es. struttura, ritenzione idrica, attività microbica) in aggiunta all'asportazione di azoto potenzialmente lisciviabile e alla sua disponibilità per il mais in successione.

5 Telerilevamento aereo di cover crop

5.1 Benefici dell'applicazione delle tecniche di precisione su cover crop

La conoscenza della variabilità delle proprietà del suolo e delle colture (biomassa, contenuto di nutrienti, stato idrico e sanitario) all'interno dei campi sono basilari per poter pianificare una distribuzione dei mezzi tecnici (fertilizzanti, fitofarmaci, acqua) a dose variabile.

La variabilità entro-campo è una condizione che si nelle cover crop può essere ancora maggiore rispetto alle colture da reddito dato che le tecniche di coltivazione sono basilari e l'assenza di concimazione consente una maggiore espressione degli effetti della variabilità compositiva del terreno sulla produzione. Ciò fa sì che dopo la terminazione della cover crop, la coltura da reddito possa beneficiare di una disponibilità di nutrienti differenziata che potrà essere uniformata attraverso la distribuzione di concimi in dosi variabili. Dunque, il telerilevamento ottico delle cover crop, eventualmente supportato da scouting con analisi rapide eseguite a terra, può essere un tassello interessante della complessiva gestione di precisione della concimazione delle colture da reddito: con un unico volo effettuato in autunno sul campo di cover crop sarebbe possibile zonare il campo in base alle differenze di vigore della specie di cover crop, e attraverso la stima della sua biomassa e della concentrazione di azoto sarebbe possibile valorizzare l'azoto derivante dalle cover crop in maniera differenziata per area di campo. A quel punto, la redazione di un piano di concimazione sito-specifico metterebbe le basi per un intervento di fertilizzazione a dose variabile, permettendo una razionalizzazione dell'uso dei fertilizzanti con tutti benefici economici, agronomici ed ambientali che ne conseguono.

Per considerare l'azoto recuperato o fissato dalle cover crop occorre però una accurata quantificazione, al momento della redazione del piano di concimazione, della biomassa prodotta e della sua concentrazione di azoto. Tali stime possono essere fatte attraverso sensori ottici per il monitoraggio da remoto della vegetazione (per la stima della biomassa aerea) o attraverso sensori ottici prossimali, a contatto con la coltura (per la stima della concentrazione di azoto). L'utilizzo dei sensori ottici rientra nell'ambito delle tecniche di telerilevamento per il monitoraggio colturale. Nel caso del monitoraggio da remoto con sensori ottici per immagini (camere digitali) montati su piattaforme aeree, le informazioni sulle colture sono raccolte a distanza, in maniera non distruttiva, su larga scala e senza restrizioni nelle tempistiche di acquisizione. Inoltre, l'informazione così raccolta risulta essere distribuita spazialmente: le immagini del campo sono infatti elaborate per restituire un valore numerico (indice vegetazionale) proporzionale al vigore vegetativo dell'area monitorata. Per ogni unità spaziale dell'immagine (la cui dimensione a terra dipende dalle caratteristiche della camera e dall'altezza di volo e può variare da pochi centimetri a decine di metri) è quindi possibile stimare la biomassa aerea prodotta a partire dall'indice vegetazionale di vigore, attraverso specifiche curve di calibrazione. Le informazioni così raccolte possono essere usate per la creazione di mappe di prescrizione della concimazione da applicare con tecnologie a rateo-variabile per razionalizzare il più possibile l'uso dei fertilizzanti azotati.

In questo capitolo saranno presentati prima i metodi e poi i risultati per la costruzione delle curve di calibrazione per la stima della biomassa da drone e per la loro validazione. L'attenzione è stata prima concentrata sulla verifica della possibilità di stimare la biomassa per le singole specie di cover crop, successivamente si è voluta proporre una calibrazione globale, in grado di stimare la biomassa prodotta dalle cover crop senza distinzione per specie. La calibrazione di un'unica funzione rappresenterebbe infatti l'opzione più adatta nella realtà.

5.2 Materiali e metodi

Con lo scopo di stimare la quantità di biomassa aerea prodotta dalle cover crop e la relativa composizione in termini di concentrazione di azoto con metodi rapidi e non distruttivi sono stati effettuati diversi sorvoli del campo sperimentale di cover crop di Sant'Angelo Lodigiano (LO) per l'acquisizione di immagini multi-spettrali. I voli sono stati effettuati con un ottacottero coassiale in fibra di carbonio (**Figura 5.1**), con una massa massima al decollo di 12 kg equipaggiato con un sistema GNSS NEO-M8N e una piattaforma gimbal ha sorvolato il campo montando prima una camera MicaSense Red-Edge (MicaSense RE) a cinque canali e poi una camera commerciale Sony a6000 (Sony RGB). La camera MicaSense RE, pensata appositamente per i rilievi in campo agricolo, si compone di cinque sensori che acquisiscono nel blu (B, 475 ± 20 nm), nel verde (G, 560 ± 20 nm), nel rosso (R, 668 ± 10 nm), nel red-edge (RE, 717 ± 10 nm) e nell'infrarosso vicino (NIR, 840 ± 40 nm), ognuno della risoluzione di 1,3 MP. La camera Sony RGB è invece una camera commerciale che acquisisce le tre bande del visibile: rosso, verde e blu ad una risoluzione di 20 MP.



Figura 5.1 Ottacottero coassiale usato nella sperimentazione che monta la camera MicaSense RE.

Per quanto riguarda l'annata 2017, primo anno di sperimentazione destinato all'acquisizione dei dati utili alla calibrazione, i voli sono avvenuti nelle due date di 30 ottobre e 20 novembre 2017. Per l'anno 2018, destinato alla raccolta dei dati con cui validare le curve di calibrazione costruite l'anno precedente, si è deciso di operare con un approccio applicativo e quindi è stato effettuato un solo volo il 18 novembre 2018. I voli sono stati effettuati al mezzogiorno solare, a 60 m di altezza e con una sovrapposizione tra le immagini scattate maggiore del 75%, garantendo condizioni di luminosità pressoché costanti e una risoluzione spaziale inferiore ai 6 cm per le immagini acquisite da MicaSense RE e inferiore ai 2 cm per le immagini acquisite da Sony RGB. All'inizio di ciascun volo è stata acquisita una foto a terra di un pannello di riflettanza nota con MicaSense RE, utile per la calibrazione del sensore ovvero per trasformare le immagini digitali in mappe di riflettanza. Le fotografie acquisite durante i voli sono state quindi processate con il software Pix4Dmapper perché venissero mosaiccate in un'unica immagine del campo e perché venissero effettuate le correzioni geometriche e di illuminazione nonché la calibrazione radiometrica nel caso della camera MicaSense RE. Infine, con lo stesso software, sono stati calcolati due diversi indici vegetazionali dalle immagini MicaSense RE (**Figura 5.2**) mentre le altezze delle piante sono state stimate a partire dalle immagini Sony RGB grazie alla costruzione di un modello tridimensionale del campo: il digital surface model.

Gli indici vegetazionali sono stati calcolati come segue: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ e $Clg = (NIR / G) - 1$. L'indice NDVI è stato scelto perché risulta essere l'indice vegetazionale più comunemente usato nell'ambito del monitoraggio ottico delle colture, mentre l'indice Clg è stato scelto per l'alta capacità di discriminare tra i molteplici livelli di verde che può assumere il fogliame delle colture, rispetto agli indici basati sulla banda del rosso come il più diffuso NDVI.

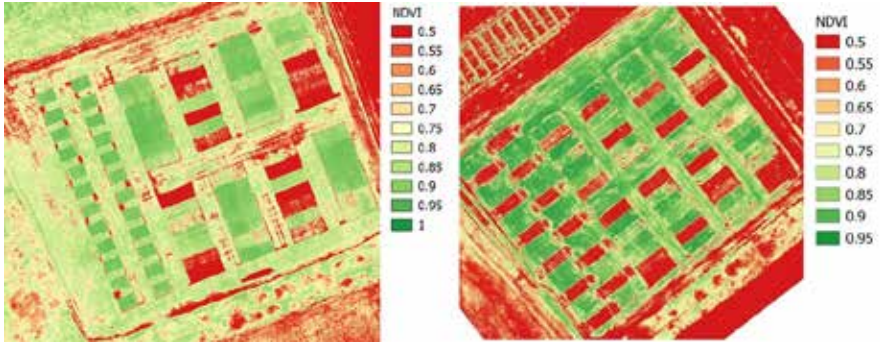


Figura 5.2 Mappe dell'indice vegetazionale NDVI nell'anno 2017 (a sinistra) e nell'anno 2018 (a destra).

I sorvoli del campo sono avvenuti il giorno precedente i campionamenti a terra della biomassa per la determinazione dei pesi secchi. Così è stato possibile costruire curve di risposta dell'indice vegetazionale alle variazioni di biomassa. I software utilizzati per l'analisi statistica sono stati Excel e MATLAB con cui sono state calcolate le statistiche descrittive delle variabili di interesse e le curve di calibrazione tramite regressioni lineari col metodo dei minimi quadrati (semplici o a plateau). I risultati in calibrazione sono stati riassunti tramite il calcolo del coefficiente di determinazione (R^2) mentre i risultati in validazione sono stati riassunti attraverso l'indice Root Mean Squared Error (RMSE) che è la radice dell'errore quadratico medio.

5.3 Risultati

5.3.1 In calibrazione

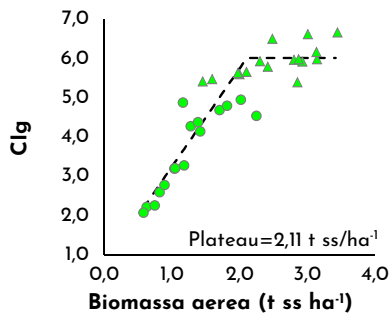
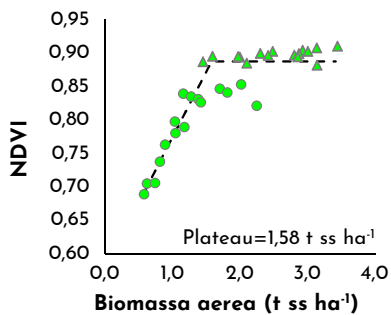
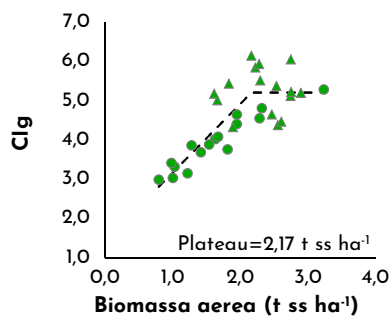
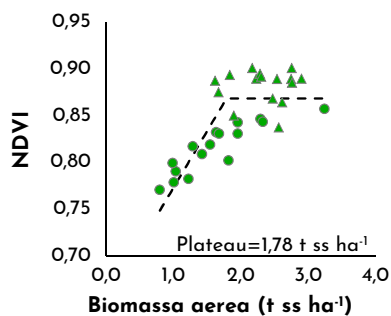
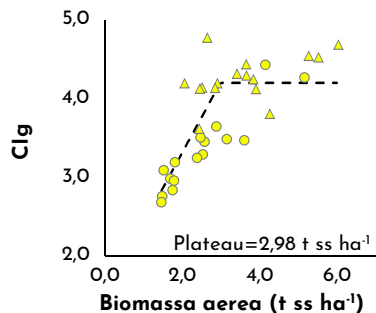
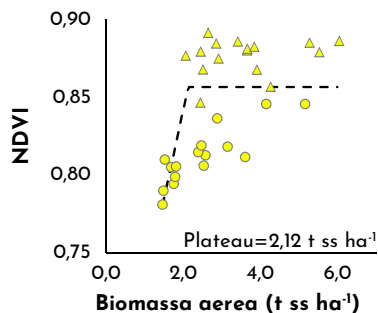
In **Tabella 5.1** sono mostrati i valori medi degli indici vegetazionali.

Tabella 5.1 Valori degli indici vegetazionali NDVI e Clg, distinti per i tre fattori dell'esperimento (specie di cover crop, data di semina e livello di azoto) e per le due date di volo dell'anno 2017.

Cover	Semina	Azoto	NDVI		Clg	
			30 ott 2017	20 nov 2017	30 ott 2017	20 nov 2017
Avena	1	N-	0,85	0,89	4,37	6,15
		N+	0,86	0,88	4,79	6,33
	2	N-	0,72	0,88	2,52	5,63
		N+	0,77	0,88	2,88	5,61
Segale	1	N-	0,85	0,86	4,27	4,89
		N+	0,86	0,86	4,52	4,80
	2	N-	0,80	0,87	3,19	5,37
		N+	0,83	0,89	3,73	5,91
Senape	1	N-	0,84	0,85	3,47	4,15
		N+	0,85	0,86	3,91	4,46
	2	N-	0,81	0,84	2,81	4,03
		N+	0,83	0,87	3,11	4,37
Trifoglio	1	N-	0,84	0,89	3,46	5,61
		N+	0,85	0,88	3,80	5,65
	2	N-	0,50	0,73	1,37	2,99
		N+	0,50	0,75	1,36	3,09
Veccia	1	N-	0,84	0,89	3,49	5,48
		N+	0,87	0,89	4,04	5,61
	2	N-	0,59	0,79	1,74	3,72
		N+	0,59	0,84	1,67	4,06

Si nota che dipendentemente dalla specie di cover crop e dall'indice vegetazionale usato, i valori dell'indice aumentano con l'aumentare della disponibilità di azoto e con il procedere della stagione vegetativa, riflettendo l'aumento della biomassa aerea vegetale. Inoltre, in

riferimento alla seconda epoca di semina, i valori degli indici vegetazionali sono inferiori rispetto alla data di semina più precoce, in accordo con la minor biomassa aerea prodotta. Questo aspetto è tanto più evidente per le specie di trifoglio e veccia che hanno sofferto maggiormente la semina ritardata. Infine, in riferimento agli indici vegetazionali, è possibile notare come i coefficienti di variazione dell'indice NDVI nelle due date di volo, rispettivamente 16% e 5%, siano inferiori ai coefficienti di variazione dell'indice Clg, pari a 32% e 20%. Questo fatto è da attribuirsi ad una maggior capacità discriminante lo stato della vegetazione da parte dell'indice basato sulla banda verde (Clg) rispetto all'NDVI, basato sul rosso. Ad ulteriore supporto di questa tesi è da considerare il più basso coefficiente di variazione dell'indice NDVI realizzato durante la campagna del volo del 20 novembre. In questo caso, i valori dell'indice sono molto simili tra loro, pur mostrando differenze per i tre fattori considerati (specie di cover crop, data di semina e livello di azoto), indicando una possibile saturazione dell'indice che fatica a discriminare tra i diversi livelli di biomassa aerea. Questa diminuzione di variabilità è osservabile in entrambi gli indici vegetazionali calcolati dalle immagini acquisite il 20 novembre ed è spiegata dal fatto che le alte biomasse prodotte hanno causato una piena copertura del terreno e una maggior uniformità del fogliame. Quindi, a partire dal dato del peso secco sono state calcolate curve di calibrazione che, per ogni valore dell'indice vegetazionale proveniente dal rilievo aereo, associano un valore di peso secco della biomassa aerea prodotta dalla cover crop. Per ognuno dei due indici calcolati in questo studio sono state prodotte le curve per la calibrazione della stima di biomassa aerea di ciascuna specie di cover crop studiata. In **Figura 5.3** sono presentati i risultati della calibrazione per ciascuna specie. Inoltre, è stato riportato il valore di biomassa in corrispondenza del quale la curva di risposta arriva a saturazione, come atteso. Il fenomeno, che è molto più importante per l'indice NDVI, si presenta ogniqualvolta a valori crescenti di biomassa, non corrisponde un aumento dei valori dell'indice vegetazionale che invece rimangono pressoché costanti. Ciò capita poiché il rilievo aereo riesce a fotografare solo gli strati superiori del fogliame e quando la coltura supera la piena copertura del campo, non è più possibile quantificare le foglie degli strati inferiori della chioma tramite le fotografie aeree. Questo comportamento, già riportato in letteratura, è stato espresso da tutte le specie di cover crop indagate.

Avena**Segale****Senape**

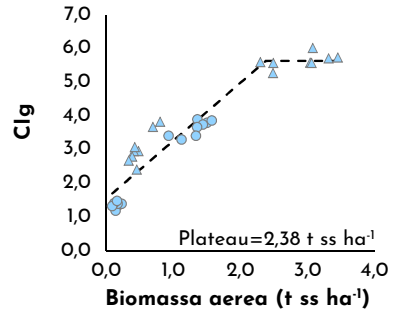
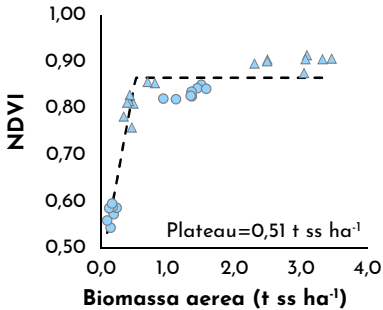
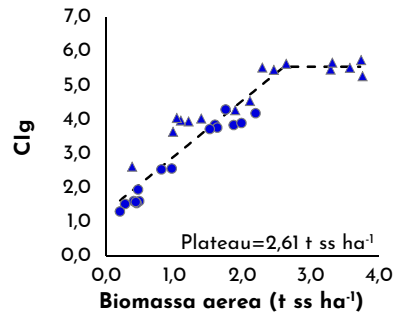
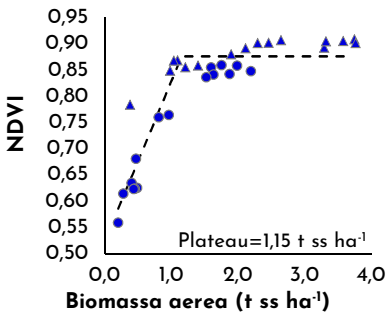
Trifoglio**Veccia**

Figura 5.3 Curve di calibrazione a plateau per la stima della biomassa aerea da NDVI e da Clg, specifiche per specie di cover crop studiata. L'indicatore cerchio indica i dati raccolti durante il primo volo del 2017 mentre l'indicatore triangolo indica i dati raccolti nella seconda campagna di voli dello stesso anno.

Come osservabile in **Figura 5.3**, le biomasse di senape e segale sono state quelle di più difficile stima. Tale difficoltà nel caso delle piante di senape dipende probabilmente dall'architettura delle piante: il portamento delle foglie marcatamente planofilo insieme con un rapido accrescimento causa una veloce copertura del suolo fin dai primi stadi di sviluppo. Poi, la coltura cresce prevalentemente in altezza con cambiamenti modesti delle proprietà ottiche. Nel caso delle piante di segale, la difficoltà di stima potrebbe risiedere nelle caratteristiche cromatiche: è caratterizzata da un verde intenso le cui differenze sono più difficilmente misurabili dagli indici vegetazionali che hanno un range di variazione inferiore rispetto alle biomasse.

Infine, nonostante le curve costruite con l'NDVI mostrino un migliore adattamento ai dati misurati, l'indice Clg è meno sensibile al fenomeno di saturazione ovvero, perde la capacità di stimare la biomassa a valori produttivi più alti e più costanti. In ogni caso, questo fenomeno renderebbe inutilizzabili, dal punto di vista applicativo, le curve per entrambi gli indici. Si è quindi pensato di correggere l'indice vegetazionale con una variabile che fosse meno sensibile alla specie, alle condizioni locali e che avesse una relazione lineare con la biomassa prodotta lungo tutto il ciclo vegetativo. La variabile colturale di più semplice misurazione, che risponde a questi criteri, è l'altezza delle piante. Le altezze stimate da drone sono state quindi usate per sviluppare un indice dato dal prodotto dell'indice ottico moltiplicato per la stima dell'altezza. Si è proceduto calcolando le curve di calibrazione per specie di cover crop (**Tabella 5.2**) e poi si è tentata la calibrazione di una funzione unica che fosse indipendente dalla specie di cover crop (**Figura 5.4**).

Tabella 5.2 Curve di calibrazione calcolate dal dataset del 2017 per la stima della biomassa aerea di cover crop da indice vegetazionale Clg corretto per le altezze.

Curva di calibrazione	Equazione	Coefficiente di determinazione
Avena	$0,0067 * Clg + 0,89$	0,72
Segale	$0,0083 * Clg + 1,41$	0,31
Senape	$0,0085 * Clg + 0,80$	0,79
Trifoglio	$0,0141 * Clg + 0,26$	0,82
Veccia	$0,0153 * Clg + 0,73$	0,75

Si può notare come sia stato eliminato il fenomeno della saturazione, rendendo possibile la stima della biomassa sino ai più alti livelli produttivi (**Figura 5.4**). Inoltre, poter considerare lo sviluppo in altezza della coltura, migliora la stima della biomassa di specie come la senape, altrimenti difficilmente stimabile. La stima della biomassa di segale rimane invece difficoltosa, perché la correzione per l'altezza non riesce a sopperire al ridotto range di variazione degli indici vegetazionali.

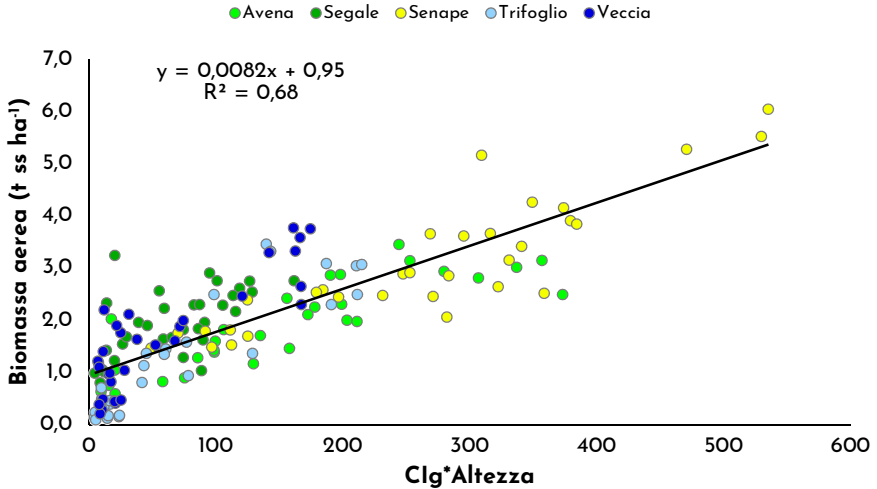


Figura 5.4 Curva di calibrazione calcolata dal dataset globale del 2017 per la stima della biomassa aerea di tutte le cover crop studiate da indice vegetazionale Clg corretto per le altezze.

5.3.2 In validazione

Le curve di calibrazione calcolate sul dataset dell'annata 2017 (**Tabella 5.1**) sono state validate sui dati raccolti nel 2018. La validazione è stata operata sulle curve di calibrazione degli indici corretti per le altezze poiché, avendo una risposta lineare alla variazione della biomassa, hanno una potenziale ricaduta applicativa.

In accordo con i valori di biomassa e di altezze misurate, gli indici vegetazionali misurati nell'annata 2018 sono inferiori o paragonabili a quelli misurati nel 2017 e mostrano mediamente, per tutte le cover, differenze in accordo con le date di semina e disponibilità di azoto come già descritto per i dati raccolti nel 2017. L'indice NDVI, più dell'indice Clg, ha sofferto di saturazione quindi la discussione dei risultati in validazione sarà focalizzata su quanto ottenuto per l'indice Clg corretto per le altezze.

In generale però è da osservare come gli indici vegetazionali non sono diminuiti proporzionalmente alla diminuzione delle biomasse misurate. Tale comportamento può essere attribuito ad un effetto dello stadio fenologico sul dato. Infatti, da un lato, a parità di copertura vegetale e biomassa, lo stadio fenologico (in termini di

diluizione dei nutrienti) può avere un effetto sul valore dell'indice vegetazionale. Tutto ciò può portare a valori degli indici vegetazionali diversi nei due anni a parità di biomassa misurata. Parallelamente è stata fatta una stima delle altezze delle piante dal volo operato con camera Sony RGB e sono stati calcolati gli indici vegetazionali poi usati per la validazione delle curve di calibrazione: simulando un contesto applicativo, la biomassa in campo è stata stimata a partire dall'indice vegetazionale e poi è stata paragonata a quella misurata realmente in campo in modo da avere una misura dell'errore che si commette nella stima. La validazione è avvenuta su un dataset ristretto rispetto a quello acquisito nel 2018 perché sono stati presi in considerazione solo gli indici che rientravano nel dominio di applicabilità del modello. La numerosità del dataset di validazione e i risultati, in termini di RMSE sono riportati in **Tabella 5.3**.

Tabella 5.3 Risultati della validazione delle curve di calibrazione per specie di cover crop relative all'indice vegetazionale $CIg \cdot Altezza$.

Curva di calibrazione	Numerosità	RMSE (t ss/ha)
Avena	15	1,00
Segale	11	0,67
Senape	12	0,78
Trifoglio	14	0,80
Veccia	15	0,86

I risultati in validazione non sono stati soddisfacenti. Le motivazioni possono essere quelle precedentemente già analizzate di effetti dell'annata (stadio fenologico) infatti, una calibrazione effettuata su un'unica località in un anno è da considerarsi poco robusta. Non si escludono inoltre errori di stima delle altezze. Tale stima infatti è dipendente dalle tecniche di elaborazione dell'immagine e quando le piante non superano i 15 cm, le asperità del terreno possono "coprire" le piantine incorrendo in stime poco robuste della loro altezza.

5.4 Conclusioni

In conclusione si può quindi ritenere che l'approccio proposto abbia una validità per l'utilizzo qualitativo del dato per la zonazione del campo, qualora fossero presenti aree a diversi livelli produttivi poiché, indipendentemente dalla robustezza del dato dell'immagine, durante uno stesso volo, i valori relativi degli indici vegetazionali comunque riflettono le differenze nello stato della vegetazione. Per quanto riguarda un utilizzo degli indici vegetazionali dal punto di vista quantitativo per la stima della biomassa a terra si può concludere che l'approccio proposto sia promettente a patto di diversi miglioramenti. Infatti, la correzione del dato spettrale per una variabile con risposta lineare alle variazioni di biomassa (ad esempio, l'altezza delle piante) ha dimostrato di poter risolvere i problemi di saturazione degli indici estendendo il dominio di applicabilità delle curve di calibrazione. Pur tuttavia, la calibrazione proposta non è risultata immediatamente utilizzabile per scopi applicativi. Infatti, le curve proposte sono state costruite su dati raccolti in un unico anno e in un'unica località, rendendo le equazioni prodotte poco generalizzabili ad altri anni e ad altre località. Quindi si ritiene che ampliando il dataset di calibrazione con più annate e località si possano produrre curve più robuste, adatte alla grande variabilità del contesto reale. A questo va affiancata un'attività di studio per il miglioramento delle stime delle altezze da drone attraverso un approfondimento delle modalità in cui diverse filiere di elaborazione delle immagini impattino sulle stime e di conseguenza dell'individuazione delle migliori tecniche di processamento da un lato, o attraverso l'utilizzo di sensori specificatamente costruiti per la loro misura ad esempio i sensori LiDAR.



6 Stima del contenuto di azoto di cover crop tramite spettroscopia NIR

6.1 Introduzione

6.1.1 La stima di N e C/N nelle cover crop

Nell'ottica di una gestione razionale delle cover crop, fra gli obiettivi del progetto CoCrop è stata prevista la stima delle asportazioni di azoto tramite scansione delle piante nella regione del vicino infrarosso, basandosi sull'utilizzo di strumenti portatili e di semplice utilizzo. Tali misure spettroscopiche, unite ad analisi chimiche di riferimento di Carbonio e Azoto, permettono infatti la costruzione di *training set* (set di calibrazione) di campioni usati nella messa a punto di funzioni di calibrazione per una stima veloce della quantità totale di azoto (N) immobilizzato dalle cover crop e reso non lisciviabile (e quindi potenzialmente disponibile per la coltura in successione), e del rapporto carbonio/azoto (C/N), che fornisce indicazioni sulla dinamica di mineralizzazione dei residui vegetali.

Un approccio di questo tipo, unito alla stima della biomassa di cover crop tramite telerilevamento, risulta efficace nel valutare la quantità e la disponibilità di azoto apportata dalle cover crop per la coltura in successione, permettendo così l'ottimizzazione dei piani di fertilizzazione. Questi risultati rientrano in un quadro di agricoltura conservativa, risultando quindi in linea con gli obiettivi primari del progetto CoCrop.

La popolazione campionaria relativa a questa parte del progetto è stata costruita utilizzando i campioni provenienti dal campo sperimentale CoCrop di S. Angelo Lodigiano (LO).

◀ Ortofoto del campo sperimentale del progetto CoCrop realizzato a Sant'Angelo Lodigiano presso la C.na Santa Martina della Fondazione Morando Bolognini. Le foto per la sua costruzione sono state scattate il 30 Ottobre 2018.

6.2 Materiali e metodi

6.2.1 Analisi spettroscopica

Per entrambi gli anni di sperimentazione, in occasione dei rilievi spettrali tramite drone e dei campionamenti di biomassa a terra, i campioni di cover crop prelevati (1 m² di vegetazione da ciascuna parcella) sono stati sottoposti a scansione nel vicino infrarosso (NIR).

La scansione è stata effettuata, per ciascuna parcella, al momento del campionamento (materiale fresco) utilizzando lo strumento portatile MicroNIR (Viavi solutions Inc., USA). Quest'ultimo è uno strumento ultracompatto dotato di un banco ottico miniaturizzato con *detector diode array* su cui è saldato un monocromatore a filtro lineare variabile, con un range spettrale di 11 000-6 000 cm⁻¹ e una risoluzione di 10 nm (125 punti); la scelta di utilizzare questa sonda è stata presa in virtù delle caratteristiche di portabilità (50 mm di altezza per 64 g di peso), di versatilità e di semplicità di utilizzo, che la rendono lo strumento ideale nell'attività di routine sul campo e in laboratorio. Nella scansione del materiale fresco, dopo una grossolana preparazione (asciugatura su carta assorbente per rimuovere l'eccesso di acqua che interferirebbe con l'assorbimento NIR, e sminuzzamento delle piante), il campione è stato trasferito e distribuito in un apposito contenitore, posizionando un pannello di vetro trasparente fra le piante e la sonda NIR e ripetendo la scansione 12 volte muovendo quest'ultima in punti diversi della superficie (**Figura 6.1A**).

Oltre all'acquisizione degli spettri del materiale fresco, l'analisi NIR è stata ripetuta sugli stessi campioni dopo essiccamento e macinazione delle piante (materiale secco). Il resto della biomassa campionata, dopo pesatura, è stato essiccato in stufa (60°C per 72h e 105°C fino a peso costante) e successivamente macinato (0,2 mm), per ottenere campioni standardizzati. L'analisi spettroscopica del materiale essiccato è stata effettuata seguendo in parallelo un duplice approccio che permettesse di valutare le calibrazioni ottenute tramite strumenti portatili e di confrontarle con quelle ottenibili con strumenti da laboratorio dalle performance più elevate. Nel primo caso gli spettri sono stati acquisiti ancora una volta tramite MicroNIR, collegando la sonda alla

base di un contenitore metallico a campana contenente la polvere ottenuta da ciascun campione, e ripetendo la misura in triplicato (**Figura 6.1B**); sugli stessi campioni è stata ripetuta l'analisi spettroscopica in triplicato anche con lo strumento da banco NIRFlex 500 (Buchi, Germania), caratterizzato da range più ampio e maggiore risoluzione (range 10 000-4 000 cm^{-1} e risoluzione di 8 cm^{-1} , 1501 punti).

Durante l'elaborazione dei dati spettroscopici ottenuti con il sistema MicroNIR per la messa a punto di curve di calibrazione sui campioni secchi, è apparsa tuttavia evidente una difformità fra i campioni dei due anni, come evidenziato dalla forma degli spettri. Nel secondo anno infatti i campioni essiccati hanno presentato valori elevatissimi di assorbanza aspecifica (albedo), che ha portato alla registrazione di spettri "appiattiti" con *offset* elevato, non utilizzabili per la costruzione di modelli predittivi. Tale fenomeno, verificato per tutte le cover crop in esame e probabilmente dovuto allo scarso sviluppo delle cover (a sua volta dovuto alla riduzione della dimensione delle cellule come conseguenza della siccità autunnale), influisce negativamente sull'uniformità della granulometria dei campioni rispetto al primo anno e ha portato ad altre difformità microscopiche, su cui ulteriori analisi sono in corso. Per ovviare a questo problema, e valutare comunque la bontà di calibrazioni basate su spettri a risoluzione ridotta tipica di uno strumento portatile, gli spettri acquisiti tramite NIRFlex 500 sono stati opportunamente tagliati e derisolati a una risoluzione paragonabile a quella del MicroNIR.

Le calibrazioni sui campioni essiccate mostrate in seguito saranno per questo motivo distinte fra quelle generate da spettri NIRFlex completi (1 501 punti) o ridotti (125 punti).

Per la caratterizzazione qualitativa del segnale infrarosso, un subset di 10 campioni scelti (una pianta in stadio precoce e una in stadio avanzato di sviluppo per ciascuna specie) è stato sottoposto ad analisi FT-MIR mediante uno spettrometro Jasco FT/IR 420 equipaggiato con un accessorio per analisi in riflettanza diffusa (DRIFT). I campioni sottoposti ad analisi sono stati prima miscelati in proporzione circa 1/100 (p/p) con KBr e macinati con un mulino per infrarosso.



Figura 6.1 Strumenti utilizzati per l'analisi spettroscopica. Strumento portatile (MicroNIR, Viavi) usato per acquisire gli spettri nella regione NIR A) delle piante verdi e B) delle piante essiccate e macinate.

6.2.2 Calibrazione curve per la stima di N e C/N

Gli spettri NIR dei campioni dei due anni acquisiti, uniti ai risultati delle analisi elementari condotte in laboratorio per quantificare N e C (metodo Dumas), sono stati utilizzati nelle elaborazioni chemiometriche, sfruttando il pacchetto PLS Toolbox versione 8.2 (Eigenvector research Inc., USA) operante in ambiente Matlab (MathWorks, USA). Le regressioni qui presentate sono state ottenute con il metodo Partial Least Squares (PLS) e Locally Weighted Regression (LWR), previa ottimizzazione dei modelli generati. Per ogni curva messa a punto sono qui riportati i risultati in cross-validazione, ottenuti escludendo ogni volta un blocco sperimentale di parcelle dalla calibrazione.

Sebbene inizialmente fosse stato ipotizzato di utilizzare solo i campioni del primo anno come *training set* per la calibrazione delle curve e di utilizzare i campioni del secondo anno come *validation set*, le differenze spettrali fra i due anni sopra descritte hanno reso preferibile ampliare i *training set* per includere i campioni di entrambi gli anni; questa scelta garantisce che le curve ottimizzate in questo lavoro includano un'ampia variabilità stagionale e di sviluppo vegetale che ben si applica al loro utilizzo in contesti agronomici diversi. Le performance nelle stime di N e C/N sono di conseguenza qui riportate come coefficiente di determinazione (R^2_{cv}) e dall'errore medio associato alla predizione in cross-validazione ($RMSE_{cv}$).

6.3 Risultati e discussione

6.3.1 Interpretazione dei profili spettrali delle cover crop nel medio e vicino infrarosso

Una caratteristica unica di ciascun oggetto è il suo spettro di riflettanza elettromagnetica, che viene determinato dall'insieme di numerose sue proprietà chimico-fisiche. Nel caso della vegetazione, gli spettri vibrazionali nelle regioni del medio e vicino infrarosso (rispettivamente analizzati con le tecniche spettroscopiche MIR e NIR) si differenziano a seconda della specie e della fase di sviluppo delle piante e dipendono, tra le altre cose, anche dalla concentrazione di costituenti azotati e inazotati della pianta; tali spettri possono quindi essere utilizzati per la stima del contenuto in azoto e del rapporto carbonio/azoto (C/N). Per questo motivo, un approccio spettroscopico basato sull'analisi degli assorbimenti MIR e NIR delle cover crop offre la possibilità di stimare questi parametri, confrontando la bontà di queste predizioni utilizzando valori di riferimento derivanti dall'analisi elementare delle concentrazioni di N e C effettuata in laboratorio.

L'assorbimento della regione MIR ($600-4\,000\text{ cm}^{-1}$) di numerosi costituenti della cellula vegetale è ben descritto in letteratura, poiché è caratterizzato da bande ben distinguibili originate dai modi vibrazionali fondamentali. È quindi possibile identificare le bande spettrali relative alle caratteristiche peculiari delle principali classi molecolari che caratterizzano i vegetali: costituenti della parete, cellulose, lignine, emicellulose e pectine, costituenti proteici e lipidici (cere, lipidi di riserva e fosfolipidi). Fra queste bande con elevato valore diagnostico vi sono quelle originate dai legami ammidici/peptidici delle proteine (i principali composti azotati delle piante, e quindi essenziali nella stima del contenuto di N) e quelle relative ai legami C-H e C-O attribuibili all'amido e alle molecole delle pareti cellulari (come cellulose e lignine, da considerare per l'impatto sul rapporto C/N). Tuttavia, da un punto di vista pratico l'analisi degli spettri nella regione MIR presenta una serie di difficoltà tecniche che la rendono incompatibile con gli scopi del progetto CoCrop; le tecniche di analisi allo stato solido permettono di analizzare aliquote molto ridotte di campione per scopi quasi solo qualitativi nel caso della tecnica

ATR (Attenuated Total Reflectance), o richiedono una preparazione laboriosa del campione nel caso della tecnica DRIFT (Diffuse Reflectance Fourier Transform spectroscopy). In quest'ultimo caso, infatti, i campioni essiccati devono subire un pretrattamento laborioso che include una macinazione molto fine con l'aggiunta di bromuro di potassio (KBr) come diluente solido del campione. Nel presente lavoro l'analisi MIR è stata utilizzata solo al fine di offrire una interpretazione qualitativa del segnale nella regione NIR che presenta bande molto larghe e altamente sovrapposte che si originano da *overtone* e combinazioni dei segnali rilevabili nella regione medio-infrarossa.

L'analisi di correlazione spettroscopica MIR vs NIR riportata in **Figura 6.2**, e nella relativa **Tabella 6.1** di attribuzione spettrale, mostra come l'informazione chimica deducibile dalle bande di nostro interesse nella regione MIR sia contenuta anche negli spettri acquisiti nella regione NIR ($4\ 000\text{-}1\ 0000\ \text{cm}^{-1}$), sotto forma di bande di *overtone* e combinazioni vibrazionali dei medesimi legami chimici. Il vantaggio della spettroscopia NIR è però dovuto all'assenza di necessità di preparare i campioni (scansionabili anche freschi), alla velocità di acquisizione degli spettri, e alla disponibilità sul mercato di strumenti portatili di facile utilizzo e dal costo contenuto. Queste osservazioni ci portano ad affermare che l'analisi NIR delle cover crop è un approccio valido per la stima di N e C/N nelle cover crop.

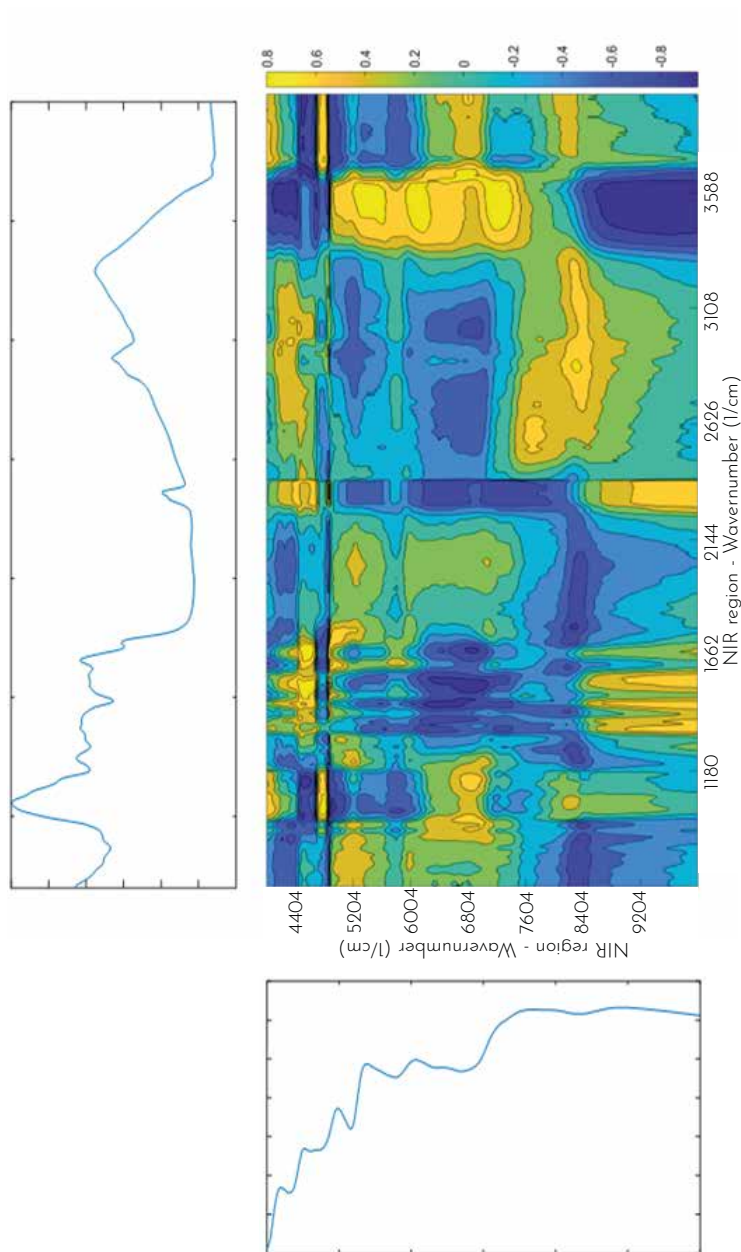


Figura 6.2 Correlazione spettrale MIR/NIR per cover crop. Grafico di correlazione fra gli spettri medi di dieci cover crop, ottenuti su campioni essiccati, (cinque specie, stadio giovane e stadio maturo) acquisiti nella regione del medio-infrarosso (MIR, tramite FT/IR 420, Jasco) e del vicino infrarosso (NIR, tramite Buchi NIRFlex). Per l'interpretazione delle principali bande osservabili e delle correlazioni si rimanda alla relativa tabella riportata in seguito.

Tabella 6.1 Descrizione qualitativa spettri cover crop delle regioni MIR e NIR. In tabella sono indicate le attribuzioni delle bande misurate per le cover crop nelle regioni MIR e NIR (in corsivo).

Numero d'onda (1/cm)	Lunghezza d'onda (nm)	Legame chimico	Vibrazione indotta	Note
1050	9524	C-O-C	stretching	
1250	8000	C-O-C	stretching in estere	
1360	7353	N-O	bending nitrati (C-O dell'anello siringile)	
1540	6494	C=C	stretching anello aromatico	
1550	6452	N-H	bending (Amide II)	
1650	6061	C=O	stretching (Amide I)	
1730	5780	C=O	stretching esteri	
2850	3509	C-H	stretching	
2930	3413	C-H	stretching	
3280	3049	O-H/ N-H	stretch	
4305	2323	CH/CH ₂	bending	
4608	2170	C-H	deformation+stretching combination	
4587	2180	N-H	bending II overtone	proteine
4748	2106	O-H/C-H	combination	cellulosa/ amido
5157	1939	O-H	bending II overtone	
5780	1730	C-H	stretching I overtone	
6349	1575	N-H	Stretching I overtone	
6729	1486	N-H / O-H	stretching I overtone	
8354	1197	C-H	stretch II overtone	

6.3.2 Calibrazioni di N e C/N sul fresco

Le curve di calibrazione ottenute a partire da materiale fresco per stimare il quantitativo totale di N delle cover crop (espresso come %N su peso secco) hanno performance adatte a una discriminazione su due livelli: questo è vero sia per la curva generata includendo nel set di calibrazione i campioni di tutte le specie di cover crop (**Figura 6.3A**, $R^2_{cv} = 0,43$, $RMSE_{cv} = 0,6$), sia per le curve ottenute da specie singole (**Figura 6.3B**) che nel complesso hanno performance quasi identiche alla curva con tutte le specie ($R^2_{cv} = 0,42$, $RMSE_{cv} = 0,6$). Analogamente, anche la stima di C/N sui campioni freschi inclu-

dendo tutte le specie si dimostra adatta solo a una quantificazione piuttosto grossolana (**Figura 6.4A**, $R^2_{cv} = 0,62$, $RMSE_{cv} = 3,0$): in questo caso, inoltre, le curve specie-specifiche hanno performance decisamente inferiori (**Figura 6.4B**, nel complesso $R^2_{cv} = 0,33$, $RMSE_{cv} = 2,8$), con performance particolarmente basse per le curve calibrate sulle due leguminose (veccia e trifoglio), come possibile risultato del range di variabilità C/N molto ridotto per queste due specie. Le performance riscontrate sono però in linea con le aspettative. Se da un lato è vero che l'acquisizione degli spettri di materiale fresco rappresenta il protocollo sperimentale in assoluto più veloce, dall'altra parte è da considerare come numerose variabili poco controllabili con questa tecnica di rilevazione contribuiscono a un'elevata variabilità spettrale non correlata alla variabilità chimica dei campioni, con il risultato di peggiorare l'analisi chemiometrica e di conseguenza la bontà delle predizioni. Fra queste variabili vi sono l'umidità di raccolta delle piante, lo sminuzzamento poco omogeneo dei campioni o il rapporto fra fusto/foglie variabile in ogni replica della scansione.

6.3.3 Calibrazioni di N e C/N sul secco

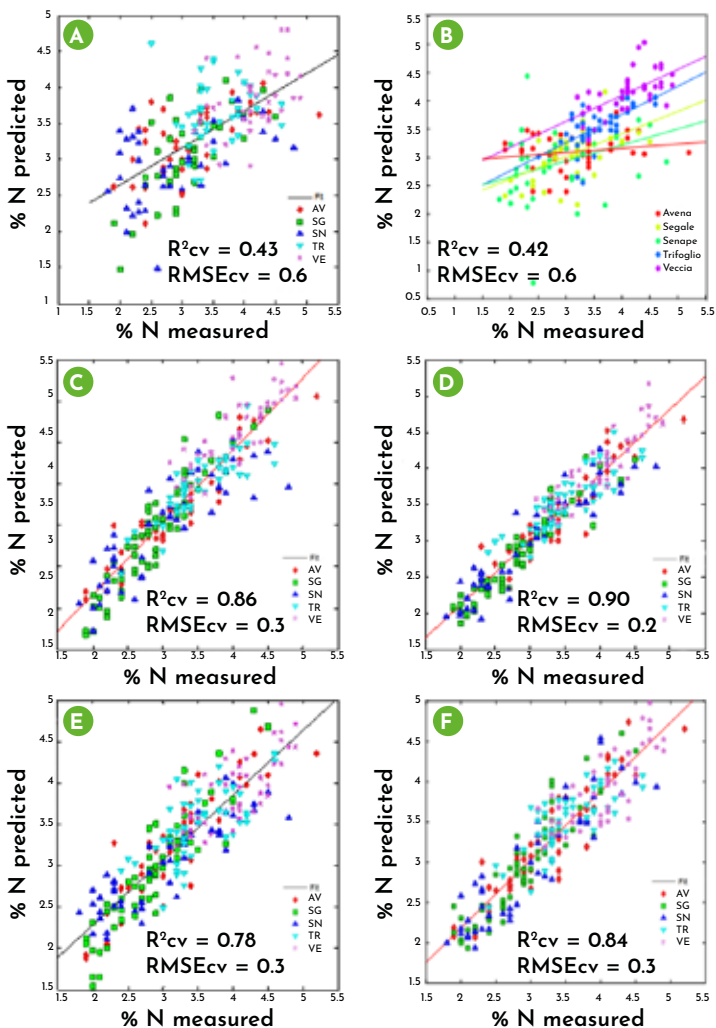
Le calibrazioni sono state ripetute sui medesimi campioni, dopo che questi sono stati essiccati e macinati, al fine di verificare se la rimozione del contenuto in acqua dei campioni e una maggiore omogeneità dei campioni si riflettesse su stime più accurate degli stessi parametri.

Le regressioni PLS (sia su tutte le specie insieme, sia messe a punto su specie singole) hanno evidenziato performance molto elevate sui campioni essiccati. Le curve PLS basate su tutti gli spettri NIR completi (strumento da banco) per N (**Figura 6.3C**, $R^2_{cv} = 0,86$, $RMSE_{cv} = 0,3$) sono caratterizzate da una correlazione molto migliore fra risultati misurati e predetti rispetto al fresco, uniti a un errore medio che si dimezza. Performance PLS più elevate nel secco rispetto al fresco si hanno anche per la stima di C/N (**Figura 6.4C**, $R^2_{cv} = 0,69$, $RMSE_{cv} = 2,0$).

In virtù dei risultati delle curve comprendenti tutte le specie, i medesimi dati di partenza sono stati utilizzati per ottimizzare una curva basata su un altro metodo di regressione, la Locally Weighted Regression (LWR). Questo è un approccio statistico non lineare, ovvero che non presuppone una linearità della risposta spettrale lungo tutto il range dei parametri analitici indagati. A differenza dell'algoritmo

PLS, nella LWR lo spettro di un campione del quale vogliamo stimare un dato chimico viene prima confrontato con tutti gli spettri presenti nel set di calibrazione (decomposti nelle loro componenti principali, PC); individuato il subset comprendente gli spettri più vicini (*local points*) - e quindi più simili - a quello del campione incognito, viene messa a punto una regressione locale PLS (caratterizzata da un numero di variabili latenti - LV - impostate dallo sperimentatore) su tale subset, che verrà utilizzata per stimare il campione incognito. Nel presente lavoro lo scopo dell'utilizzo di questa metodologia è stato quello di ridurre i fattori di variabilità spettrale legati all'annata o allo sviluppo delle cover crop non correlati con le variabili di interesse. Nella messa a punto delle curve LWR qui riportate, sono stati ottimizzati il numero di componenti principali globali, il numero di *local points*, e il numero di variabili latenti della regressione locale, così da minimizzare il valore di RMSE_{cv} e ottenere le performance più elevate possibili a partire dai set di calibrazione in esame. Come mostrato nelle **Figura 6.3D** e **6.4D**, la bontà delle predizioni basate su regressioni LWR è ulteriormente incrementata, sia per N ($R^2_{cv} = 0,90$, RMSE_{cv} = 0,2) che per C/N ($R^2_{cv} = 0,75$, RMSE_{cv} = 1,8). Infine, gli stessi approcci utilizzati per la messa a punto delle curve di calibrazione basate sugli spettri NIR completi, sono stati applicati nel caso degli spettri NIR ridotti. In questo caso, ogni spettro di partenza completo è stato tagliato per riportare il range spettrale dello strumento da banco a quello del MicroNIR, riducendo al contempo anche la risoluzione spettrale (ovvero il numero di lunghezze d'onda di cui si compone lo spettro). Nel caso della stima di N, le performance delle calibrazioni, al netto di un lieve calo, rimangono elevate sia per la regressione PLS (**Figura 3E**, $R^2_{cv} = 0,78$, RMSE_{cv} = 0,3) che per quella LWR (**Figura 6.3F**, $R^2_{cv} = 0,84$, RMSE_{cv} = 0,3). Similmente, le stime di C/N si dimostrano di buon livello (PLS: **Figura 6.4E**, $R^2_{cv} = 0,76$, RMSE_{cv} = 1,8, LWR: **Figura 6.4F**, $R^2_{cv} = 0,72$, RMSE_{cv} = 1,9); nello specifico per la stima di C/N la curva PLS degli spettri ridotti è anche migliore rispetto alla corrispondente curva su basata su spettri completi, probabilmente perché lo spettro completo mantiene una parte di variabilità spettrale scarsamente informativa per la stima del parametro chimico. I risultati di tutte le calibrazioni generate sono riportati in **Tabella 6.2**.

3. Stima di N



4. Stima di C/N

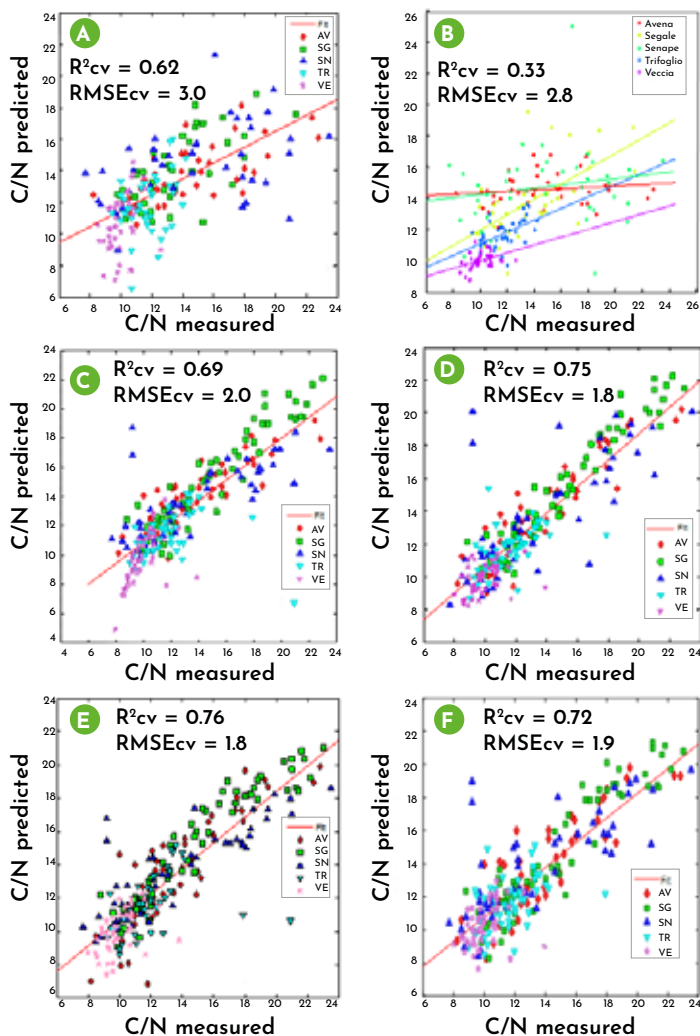


Figure 6.3-6.4 Stima del contenuto in azoto (%N su peso secco) e di C/N delle cover crop, risultati in cross-validazione.

Calibrazioni sui campioni freschi: A) Regressione PLS comprendente tutte le specie; B) Regressioni PLS specie-specifiche (performance complessive); Calibrazioni sui campioni essiccati (spettri completi): C) Regressione PLS comprendente tutte le specie; D) Regressione LWR comprendente tutte le specie; Calibrazioni sui campioni essiccati (spettri ridotti): E) Regressione PLS comprendente tutte le specie; F) Regressione LWR comprendente tutte le specie.

Tabella 6.2 Performance dei modelli per la stima di N e C/N delle cover crop. In tabella sono indicate le performance in cross validazione della stima dei parametri N e C/N a partire dagli spettri delle cover crop fresche ed essiccate.

Parametro stimato	Campioni	Performance calibrazioni	Modello PLS su tutte le specie	Modello LWR su tutte le specie	Modelli PLS su specie singole
%N Range: 1.9-5.2	FRESCO	R ² _{cv}	0.43	-----	0.42
		RMSE _{cv}	0.6		0.6
	SECCO (spettri completi)	R ² _{cv}	0.86	0.90	0.88
		RMSE _{cv}	0.3	0.2	0.25
	SECCO (spettri ridotti)	R ² _{cv}	0.78	0.84	0.79
		RMSE _{cv}	0.3	0.3	0.3
C/N Range: 7.7-23.5	FRESCO	R ² _{cv}	0.62	-----	0.33
		RMSE _{cv}	3.0		2.8
	SECCO (spettri completi)	R ² _{cv}	0.69	0.75	0.70
		RMSE _{cv}	2.0	1.8	2.0
	SECCO (spettri ridotti)	R ² _{cv}	0.76	0.72	0.83
		RMSE _{cv}	1.8	1.9	1.5

6.4 Conclusioni

Le attività previste per questo task del progetto CoCrop hanno portato al raggiungimento degli obiettivi previsti dall'analisi spettroscopica NIR. Si è dimostrato come sia possibile ottimizzare curve di calibrazione con performance elevate per la stima di N e C/N nelle cover crop, che, insieme alle stime di biomassa tramite telerilevamento, saranno utili per ottimizzare la concimazione delle colture in successione. Si è inoltre dimostrato come l'acquisizione degli spettri NIR tramite strumenti portatili (o l'analisi effettuata su spettri con range e risoluzione paragonabili a questi ultimi) permetta una stima di questi parametri sui campioni essiccati. I risultati dimostrano che la scansione di piante fresche a bordo campo permette stime meno accurate rispetto all'analisi dei campioni essiccati; è a questo proposito opportuno sottolineare che, sebbene l'essiccamento e la macinazione dei campioni di cover crop allunghino i tempi delle analisi rispetto alla scansione del materiale fresco, questa minima

procedura di pretrattamento dei campioni permette di ottenere stime molto più affidabili. Tali misure comunque risultano essere compatibili con le tempistiche agronomiche, perché possono avvenire dal momento della terminazione delle cover al momento dell'ottimizzazione dei piani di concimazione.

Infine, avendo ottenuto curve dalle elevate performance basandosi su set di calibrazione comprendenti più specie, epoche di semina, livelli di fertilizzazione e stagioni colturali diverse, le curve risultano essere robuste rispetto a un loro utilizzo in contesti agronomici diversi che prevedano l'utilizzo di cover crop.

7 Strumento per la stima dell'azoto utile da cover crop

7.1 Presentazione dello strumento decisionale

Lo strumento decisionale ha l'**obiettivo** di consentire una stima del credito di azoto che alcune cover crop rendono disponibile per la successiva coltura da reddito. Questo valore può essere inserito nel bilancio dell'azoto (compilato per redigere il piano di concimazione della coltura da reddito) tra le voci di input, analogamente alla mineralizzazione di azoto del terreno, o all'azoto contenuto nelle precipitazioni atmosferiche. Se è stata coltivata una cover crop, si raccomanda di ridurre la quantità di "azoto pronto" nel bilancio della coltura da reddito (ad es. impostandolo a zero), in quanto può capitare che, soprattutto in periodi autunno-vernini non particolarmente piovosi, l'azoto minerale disponibile nel terreno dopo la distruzione della cover crop sia inferiore a quello dei terreni che non l'hanno ospitata.

I crediti sono **calcolati** moltiplicando la biomassa aerea della cover crop per la sua concentrazione in azoto e per il suo coefficiente di recupero apparente. Il sistema assiste l'utente nella stima di queste tre grandezze.

Questo **manuale** presenta i concetti su cui è basata la stima delle tre variabili e illustra i passi necessari all'utilizzo del sistema di calcolo; infine fornisce istruzioni per le misure di pieno campo a supporto dell'utilizzo del sistema (misura della biomassa aerea e dell'altezza). Si suppone che la misura della concentrazione in azoto del campione sia effettuata da un laboratorio specializzato cui è conferito il campione di biomassa.

Lo strumento decisionale è stato messo a punto per le specie coltivate nel progetto CoCrop: segale, avena strigosa, veccia villosa, trifoglio alessandrino e senape bianca.

La base documentale dello strumento decisionale consiste negli esperimenti di pieno campo del progetto CoCrop (descritti in altri

capitoli di questa brochure), integrati da un'analisi della letteratura scientifica di esperimenti di pieno campo con cover crop in ambienti temperati.

Nota bene: il presente strumento è fornito a scopo dimostrativo e utilizzato dall'utente sotto la sua responsabilità.

7.2 Istruzioni per l'uso dello strumento decisionale

Lo strumento decisionale è un foglio di calcolo Excel che può essere scaricato dal sito del sito del progetto CoCrop: <https://sites.unimi.it/cocrop>. All'apertura del foglio Excel sarà necessario autorizzare l'utilizzo delle macro.

7.2.1 Passo 1. Inserimento dei dati di base della cover crop

In questo primo foglio è necessario selezionare, attraverso due menu a tendina, la specie di cover crop e l'epoca di semina.

7.2.2 Passo 2. Stima della biomassa aerea

Per stimare la biomassa aerea l'utente ha tre possibilità (**Figura 7.1**).

- A) Se l'utente non ha effettuato nessuna misura in campo della biomassa delle cover crop, il sistema propone una **stima in base alla specie e all'epoca di semina**. Sono forniti valori indicativi misurati nelle prove biennali del progetto CoCrop per due epoche di semina (prima e seconda metà di settembre) in due località. È opportuno sottolineare che si tratta di dati da utilizzare con cautela vista la ristretta base sperimentale, anche considerando le particolari condizioni meteorologiche che hanno caratterizzato il biennio.
- B) Se l'utente ha effettuato la misura dell'**altezza della cover crop**, il sistema può utilizzarla per stimare la biomassa aerea.
- C) Se l'utente ha effettuato la **misura della biomassa** fresca e ha poi proceduto ad essiccarla in stufa per determinarne il peso secco, il sistema riceve questa informazione.

	A	B	C	D
1	Per la stima della biomassa aerea ci sono tre possibilità			
		A) Non ho misurato né la biomassa secca né l'altezza della cover crop: stima tabellare	B) Ho misurato l'altezza della cover crop	C) Ho misurato la biomassa secca della cover crop (g ss/m ²)
2				
3	Biomassa secca della cover crop (g ss/m²)			
4	Altezza della cover crop (cm)			
5	Stima della biomassa aerea min (t ss/ha)	2.0		
6	Stima della biomassa aerea max (t ss/ha)	4.0		
7	Stima della biomassa aerea media (t ss/ha)	3.0		
8				
9				
10				
11				
12				

Figura 7.1 Stima della biomassa aerea nello strumento decisionale.

7.2.3 Passo 3. Stima della concentrazione in azoto della cover crop

Esistono due possibilità per la stima della concentrazione in azoto della cover crop (**Figura 7.2**).

- A) La più onerosa è la **misura diretta**, che prevede il campionamento della biomassa e l'invio ad un laboratorio per l'analisi della concentrazione in azoto totale. I valori espressi in percentuale vanno moltiplicati per 10 in modo da essere correttamente usati dal sistema (che accetta concentrazioni espresse in kg N t^{-1} sostanza secca); i valori espressi in g N kg^{-1} sono equivalenti ai kg N t^{-1} .
- B) In alternativa, il sistema consente all'utente la **stima della concentrazione di azoto** sulla base della biomassa aerea. A tale scopo è sufficiente che l'utente dichiari il tipo di fertilità del terreno (alta, media o bassa). Si suggerisce di usare "alta" per terreni con alto contenuto di sostanza organica, soggetti ad applicazioni di effluenti, o anche per situazioni di elevata disponibilità di azoto minerale ad esempio a causa di un incompleto sfruttamento dell'elemento da parte della precedente coltura da reddito. Viceversa, situazioni di "bassa" fertilità saranno quelle caratterizzate da terreni con scarso contenuto di sostanza organica, assenza di recenti applicazioni di effluenti, ridotte concimazioni azotate alla coltura precedente.

7.2.4 Passo 4. Stima dell'efficienza agronomica apparente dell'azoto apportato con la cover crop

Esistono due possibilità per la stima dell'efficienza agronomica apparente dell'azoto della cover crop (**Figura 7.3**).

- La prima possibilità consiste nell'utilizzare un valore già di conoscenza dell'utente (sulla base della sua **esperienza**, dell'interazione con altri o dalla lettura di documenti).
- La seconda possibilità prevede la stima dell'efficienza da parte del sistema decisionale; tale stima è basata su un'equazione di **regressione tra l'efficienza apparente e il rapporto C/N** della biomassa vegetale. Il rapporto C/N è calcolato assumendo una concentrazione fissa di carbonio e usando la concentrazione di azoto stimata al punto precedente. Infine, l'efficienza apparente viene diminuita per tenere conto dell'incompleta efficienza dell'azoto mineralizzato. Per utilizzare questa modalità l'utente non deve fare nulla, in quanto viene attivata automaticamente se non è stato inserito nessun valore conosciuto nella colonna precedente.

	A	B	C	D	E
1	Per la stima della concentrazione di azoto ci sono due possibilità				
2	A) Ho misurato la concentrazione di azoto (se il valore è espresso in percentuale, moltiplicarlo per 10)				
3	B) Non ho misurato la concentrazione di azoto, ma posso giudicare la fertilità del terreno				
4	Alta 40				
5	Fertilità del terreno				
6	Concentrazione di azoto (kg N/t ss)				
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					

Figura 7.2 Stima della concentrazione di azoto della biomassa aerea nello strumento decisionale.

	A	B	C	D
1	Per la stima dell'efficienza apparente ci sono due possibilità			
2	A) Conosco già un valore sulla base della mia esperienza		B) Desidero una stima	
3	Efficienza agronomica apparente (valore in percentuale, compreso tra 0 e 100)		22	
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Figura 7.3 Stima dell'efficienza apparente dell'azoto nello strumento decisionale.

7.2.5 Passo 5. Calcolo del contributo azotato della cover crop

In questo foglio riassuntivo (**Figura 7.4**) sono mostrati i valori delle tre grandezze inserite o stimate (biomassa aerea, sua concentrazione in azoto, efficienza apparente) e il loro prodotto che dovrà essere inserito nel piano di concimazione.

1	Grandezza	B	C	D
2	Riassunto dei dati immessi o calcolati	Unità di misura	Valore	
3	Biomassa aerea della cover crop	t ss/ha	3,0	
4	Stima della concentrazione di azoto	kg N/t ss	40	
5	Efficienza apparente dell'azoto della cover crop	%	23	
6				
7	Risultato da inserire nel bilancio dell'azoto della coltura che segue			
8	Contributo della cover crop alla coltura che segue	kg N/ha	28	
9				
10				
11				
12				
13				
14				

Figura 7.4 Calcolo del contributo azotato della cover crop nello strumento decisionale.

7.3 Misura della biomassa aerea della cover crop: campionamento ed essiccazione

Si descrive di seguito come prelevare un campione di biomassa vegetale rappresentativo di un appezzamento. Se nella parcella sono presenti anche le piante infestanti, queste devono essere incluse nel campione.

L'elenco degli strumenti e materiali necessari include:

- Forbice da prato o coltello affilato
- Sacchi di carta (lunghezza indicativa 80 cm, larghezza 40 cm)
- Pennarello
- Metro da muratore, 4 picchetti, cordino di 5 metri
- Bilancia o dinamometro

Per il campionamento seguire questa procedura:

1. Osservare la vegetazione, valutandone l'eterogeneità, e scegliere un metro quadrato che sia rappresentativo di una zona dell'appezzamento, sia in termini di vigore/altezza della cover, sia in termini di presenza di piante infestanti.
2. Delimitare l'area da campionare collocando i quattro picchetti ai vertici di un quadrato di 1 m di lato, collegandoli con il cordino. Tagliare a circa 2 cm di altezza tutta la vegetazione compresa nel quadrato (**Figura 7.5**). Non prelevare residui della coltura precedente o altri residui legnosi eventualmente presenti. Collocare tutte le piante raccolte in un sacchetto con l'indicazione della data e del luogo di prelievo.
3. Nel caso di cover crop seminate a file, annotare il numero di file raccolte e ricalcolare l'area campionata moltiplicando il numero di file per la distanza interfila. Per esempio, se la distanza tra le file è 0,15 m e sono state prelevate 6 file da 1 m, l'area campionata sarà pari a $6 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} = 0,90 \text{ m}^2$.
4. Determinare il peso del sacchetto contenente la vegetazione avvalendosi del dinamometro o della bilancia.



Figura 7.5 Il terreno dopo il prelievo di un metro quadrato di vegetazione.

5. Ripetere il campionamento in almeno quattro punti per appezzamento.
6. Dopo avere riunito tutti i campioni di un appezzamento, tagliare la vegetazione a pezzi di circa 5 cm ed estrarre un sub-campione rappresentativo del peso di 500 g, su cui eseguire la determinazione della sostanza secca come descritto al prossimo punto.
7. Collocare in stufa i campioni prima a 65°C fino ad appassimento, e poi a 105°C fino a peso costante.
8. Pesare i campioni secchi.

7.4 Misura dell'altezza della cover crop

Per la determinazione dell'altezza della cover crop utilizzare un semplice strumento costituito da un'asta graduata e da una lastra di polistirolo di forma quadrata con lato di 50 cm, spessore di 2 cm e presentante un foro al centro. L'asta, inserita nel foro centrale del polistirolo, deve essere collocata all'interno dell'area da campionare. La lastra di polistirolo è quindi lasciata cadere fino a che non si appoggia sulla sommità della coltura, permettendo di leggere l'altezza di quest'ultima sull'asta graduata. Effettuare almeno quattro misurazioni per appezzamento.



8 Costi e benefici delle cover crop

8.1. Stima dei costi di coltivazione delle cover crop

I costi variabili legati alla coltivazione delle cinque cover crop oggetto di studio (segale, avena strigosa, trifoglio alessandrino, veccia villosa e senape bianca) sono stati stimati sulla base delle registrazioni analitiche che le due aziende coinvolte nel progetto CoCrop hanno realizzato circa i consumi, i tempi di lavoro ed il prezzo dei mezzi tecnici (costi variabili). Non sono invece stati quantificati i costi fissi, relativi all'ammortamento e alla manutenzione del parco macchine. Nelle tabelle di questo capitolo, gli acronimi Motti e FMB indicano rispettivamente l'azienda agricola "Agricola Motti" di Massimo Motti e l'azienda agricola della Fondazione Morando Bolognini. Assumendo che le cover crop seguano una coltura di mais, sono stati quantificati i costi relativi alle seguenti operazioni: trinciatura degli stocchi, erpicatura con erpice da minima lavorazione, semina, irrigazione e terminazione della cover crop sia tramite diserbo sia tramite discatura (**Tabella 8.1**).

Tabella 8.1 Componenti dei costi delle operazioni colturali.

Az. Agr.	Operazione	Fattore produttivo	Quantità (l ha ⁻¹ o h ha ⁻¹ o kg ha ⁻¹)	Costo unitario (€ l ⁻¹ o € h ⁻¹ o € kg ⁻¹)	Costo totale €/ha
FMB	Trinciatura degli stocchi	Gasolio	7,0	0,70	4,90
FMB	Trinciatura degli stocchi	Manodopera	1,0	20,00	20,00
FMB	Erpicatura	Gasolio	20,0	0,70	14,00

◀ Cover crop terminate in primavera con glifosate

Tabella 8.1 Continuazione dalla pagina precedente.

Az. Agr.	Operazione	Fattore produttivo	Quantità (l ha ⁻¹ o h ha ⁻¹ o kg ha ⁻¹)	Costo unitario (€ l ⁻¹ o € h ⁻¹ o € kg ⁻¹)	Costo totale €/ha
FMB	Erpicatura	Manodopera	1,0	20,00	20,00
FMB	Semina	Gasolio	5,0	0,70	3,50
FMB	Semina	Manodopera	1,0	20,00	20,00
FMB	Irrigazione	Gasolio	53,0	0,70	37,10
FMB	Irrigazione	Manodopera	2,7	20,00	53,40
FMB	Terminazione chimica	Glifosate p.a.	1,8	9,72	17,50
FMB	Terminazione chimica	Gasolio	5,0	0,70	3,50
FMB	Terminazione chimica	Manodopera	0,3	20,00	6,66
FMB	Terminazione, discatura	Gasolio	25,0	0,70	17,50
FMB	Terminazione, discatura	Manodopera	1,0	20,00	20,00
Motti	Trinciatura degli stocchi	Gasolio	10,3	0,75	7,73
Motti	Trinciatura degli stocchi	Manodopera ¹	0,6	17,50	10,33
Motti	Erpicatura	Gasolio	11,3	0,75	8,51
Motti	Erpicatura	Manodopera	0,9	17,50	15,75
Motti	Semina	Gasolio	12,5	0,75	9,38
Motti	Semina	Manodopera	0,8	17,50	14,00
Motti	Irrigazione	Gasolio	17,0	0,75	12,75
Motti	Irrigazione	Manodopera	1,0	17,50	17,50
Motti	Terminazione chimica	Glifosate p.a.	1,4	13,54	19,50
Motti	Terminazione chimica	Gasolio	2,0	0,75	1,50
Motti	Terminazione chimica	Manodopera	0,5	17,50	8,75
Motti	Terminazione, discatura	Gasolio	15,0	0,75	11,25
Motti	Terminazione, discatura	Manodopera	0,5	17,50	8,75
Entrambe	Semina	Seme segale	150,0	0,70	105,00
Entrambe	Semina	Seme avena	50,0	1,80	90,00
Entrambe	Semina	Seme trifoglio	25,0	2,40	60,00
Entrambe	Semina	Seme veccia	40,0	2,40	96,00
Entrambe	Semina	Seme senape	15,0	2,50	37,50

¹ Nel caso dell'Azienda Motti, per la manodopera è stato utilizzato un costo medio per conduttore-meccanico di macchine agricole poiché la stima di quello effettivo risultava complessa data la conduzione familiare dell'azienda.

La composizione del parco macchine utilizzato nelle due aziende per la coltivazione delle cover è riportata nella **Tabella 8.2**.

Tabella 8.2 Composizione del parco macchine

Az. Agr.	Operazione	TRATTRICE				OPERATRICE			
		Marca	Modello	Potenza (kW)	Tipo	Marca	Modello	Potenza (kW)	Tipo
FMB	Trinciatura stocchi	New Holland	T 6070	104	Trincias tocchi	Kverneland	FX / 280		
FMB	Minima lavorazione	John Deere	195 M	143	Erpice	Lemken	Karat 9		
FMB	Semina	New Holland	TD5.115	83	Seminatrice	SULKY	Tramline		
FMB	Irrigazione	Landini	145 Legend	101	Rotolone	Irrimec	110 TG 320		
FMB	Diserbo	Mc Cormick	CX 100	74	Irroratrice	Caffini	Prestige 2500		
FMB	Discatura	New Holland	T 6070	104	Erpice a dischi	ma / ag	ED "V" 780		
Motti	Trinciatura stocchi	John Deere	4440	117	Trincias tocchi	Kverneland	fxn		
Motti	Minima lavorazione	New Holland	G170	125	Erpice	Kverneland	clc		
Motti	Semina	New Holland	G170	125	Seminatrice	John Deere	750		
Motti	Irrigazione	New Holland	TL 100	73	Pompa	Veneroni	ATR 40		
Motti	Diserbo	Fendt	GT250	33	Irroratrice	RAU			
Motti	Discatura	New Holland	TL 100	73	Erpice a dischi	ma / ag	EDX 780		

I costi totali di coltivazione delle cover crop sono stati innanzitutto calcolati per una gestione ordinaria che comprende la trinciatura degli stocchi, la minima lavorazione, la semina e la terminazione chimica con glifosate, quest'ultima solo nel caso delle specie ingelive. I risultati ottenuti (**Tabella 8.3**) hanno evidenziato uno scostamento relativamente modesto tra i costi delle due aziende, pari a 17 €/ha nel caso delle cover crop gelive (avena, trifoglio e senape) e 15 €/ha nel caso delle ingelive (segale e veccia) mentre le variazioni indotte dalla specie di cover crop sono risultate più consistenti.

Tabella 8.3 Costi variabili totali (€ ha⁻¹) per la coltivazione delle cover crop. Le operazioni colturali considerate sono: trinciatura degli stocchi, minima lavorazione, semina e terminazione, quando necessaria.

Az. Agricola	Segale	Avena	Trifoglio	Veccia	Senape
Totale FMB	215	172	142	206	120
Totale Motti	200	156	126	191	103
Media	208	164	134	199	112

Il costo medio di coltivazione è risultato così ordinato: senape (112 €/ha), trifoglio (134), avena (164), veccia (199), segale (208). Le specie gelive risultano più economiche dato che non necessita una loro terminazione. Tra tutte, la specie più economica è risultata essere la senape poiché alla gelività associa anche un basso costo per la semente, pari a 37,5 €/ha. All'opposto, la specie più costosa è stata la segale poiché richiede l'intervento di terminazione ed ha inoltre il più alto costo per la semente, pari a 105 € ha⁻¹.

Il costo per l'esecuzione di un intervento d'irrigazione di soccorso è risultato molto diverso tra le due aziende in relazione alla modalità di distribuzione dell'acqua. Nel caso dell'Azienda FMB, in cui è stata considerata l'aspersione tramite rotolone, il costo è risultato pari a 91€/ha. Nel caso dell'Azienda Motti, invece, per un intervento a scorrimento il costo è risultato essere di 30 €/ha. Si precisa che il costo dell'acqua non è stato considerato in quanto esso è fisso, annuale, e viene già fatto gravare sulla coltura principale.

Infine, è stato quantificato il costo della terminazione meccanica delle cover crop tramite discatura, come alternativa a quella chi-

mica con glifosate. I dati rilevati nelle due aziende hanno fornito un'indicazione contrastante: nel caso dell'Azienda Motti la terminazione produce una riduzione dei costi pari a 10 €/ha mentre nel caso dell'Azienda FMB si ha un aggravio dei costi di 10 €/ha.

8.2. Benefici delle cover crop

Uno dei benefici derivanti dalla coltivazione delle cover crop è la riduzione del fabbisogno di concimi azotati. La disponibilità di azoto assimilabile per la coltura da reddito in successione può infatti essere incrementata dalla mineralizzazione che avviene durante la decomposizione della biomassa delle cover crop dopo la loro terminazione.

Per fornire una quantificazione orientativa di questo beneficio abbiamo utilizzato i valori di produzione e composizione delle cover crop (concentrazione di N e C) rilevati nei due anni di prove del progetto CoCrop. Con essi sono state calcolate le asportazioni di azoto (N_{asp}) ed il rapporto C/N. Quest'ultimo è stato utilizzato per stimare la mineralizzazione dell'azoto delle cover crop (N_{min}, espressa in percentuale dell'azoto contenuto nei tessuti della cover crop) attraverso la seguente equazione di regressione derivata da un insieme di dati ottenuti dalla letteratura: $N_{min} (\%) = -1,76 x + 61,6$, dove x è il rapporto C/N delle cover crop. La base di dati dell'equazione è riferita in **Figura 3.7**.

L'azoto disponibile (N_{disp}) derivante dalla mineralizzazione delle cover crop è stato quindi calcolato moltiplicando l'azoto da esse asportato (N_{asp}) per N_{min} (%).

Infine, per calcolarne il valore economico equivalente, l'azoto disponibile è stato moltiplicato per il prezzo dell'unità fertilizzante azotata da urea, pari a 0,79 € kg⁻¹ (ottenuto dal prezzo medio dell'urea sulla piazza di Modena nel 2018, che è stato pari a 0,364 € kg⁻¹).

I risultati, riferiti alle singole specie e mediati per data di semina (DS 1, semina a fine agosto-inizio settembre; DS 2, semina alla seconda-terza settimana di settembre), sono riportati in **Tabella 8.4**.

Tabella 8.4 Azoto disponibile per la coltura da reddito che segue la cover crop (penultima riga) e suo valore economico. *N asp*: azoto asportato dalle cover crop; *C/N*: rapporto carbonio/azoto delle cover crop; *N min*: stima dell'azoto mineralizzato dalle cover crop; *N disp*: calcolato moltiplicando *N asp* per *N min*; Valore *N*: calcolato moltiplicando *N disp* per un costo dell'azoto di 0,79 € kg⁻¹. Si veda il testo per maggiori dettagli.

Voce	Segale		Avena		Trifoglio		Veccia		Senape	
	DS 1	DS 2	DS 1	DS 2	DS 1	DS 2	DS 1	DS 2	DS 1	DS 2
N asp (kg ha⁻¹)	55	57	59	53	73	21	103	41	76	74
C/N	18	14	18	14	12	12	10	11	19	13
N min (%)	30	36	30	37	40	40	43	43	28	39
N disp (kg ha⁻¹)	17	21	18	20	29	9	45	17	21	29
Valore N (€ ha⁻¹)	13	16	14	16	23	7	35	14	17	23

L'azoto disponibile è risultato variare da 9 a 45 kg ha⁻¹ con valori economici equivalenti variabili da 7 a 35 € ha⁻¹.

Confrontando le due epoche di semina, emerge che mentre l'apporto di azoto disponibile delle graminacee (segale e avena) e della brassicacea (senape) tende ad aumentare passando da DS 1 a DS 2, diversamente quello delle leguminose (trifoglio e veccia) diminuisce marcatamente. La tendenza all'incremento nelle prime è dovuto all'abbassamento del rapporto C/N, che aumenta la mineralizzazione (a fronte di una minima variazione dell'azoto asportato), mentre il calo stimato per le leguminose è imputabile alle basse produzioni rilevate nelle semine ritardate. Considerando l'epoca di semina DS 1, le specie studiate sono risultate così ordinate per la loro capacità di apportare azoto disponibile: segale (17 kg ha⁻¹), avena (18), senape (21), trifoglio (29), veccia (45).

Il valore economico equivalente dell'azoto disponibile apportato è risultato in grado di coprire le spese di coltivazione delle cover crop per una quota variabile dal 5 al 20%. È però molto importante sottolineare che altri benefici possono concorrere a definire la sostenibilità economica di queste colture, come ad esempio la riduzione dei problemi di erosione dei suoli, la migliore risposta dei suoli alle minime lavorazioni ed il minor impiego di fitofarmaci per il controllo della flora infestante. Accanto a questi benefici di più immediato interesse aziendale, vi sono poi quelli d'interesse collettivo come la tutela delle acque di falda dall'inquinamento da nitrati e fosfati e l'aumento dello stoccaggio di carbonio nel suolo. Di conseguenza sarebbe riduttivo valutare la convenienza delle cover crop sulla base del solo bilancio azotato presentato in questo paragrafo.

9 Bibliografia

- Alcántara, C., Pujadas, A., Saavedra, M., 2011. Management of cruciferous cover crops by mowing for soil and water conservation in southern Spain. *Agricultural Water Management* 98, 1071–1080. doi:10.1016/j.agwat.2011.01.016
- Alcántara, C., Sánchez, S., Pujadas, A., Saavedra, M., 2009. Brassica species as winter cover crops in sustainable agricultural systems in southern Spain. *Journal of Sustainable Agriculture* 33, 619–635.
- Andrews, J.S., Sanders, Z.P., Cabrera, M.L., Saha, U.K., Hill, N.S., 2018. Nitrogen Dynamics in Living Mulch and Annual Cover Crop Corn Production Systems. *Agronomy Journal* 110, 1309. doi:10.2134/agronj2017.10.0609
- Baggs, E.M., Watson, C.A., Rees, R.M., 2000. The fate of nitrogen from incorporated cover crop and green manure residues. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, 153–163.
- Basche, A.D., Miguez, F.E., Kaspar, T.C., Castellano, M.J., 2014. Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* 69, 471–482. doi:10.2489/jswc.69.6.471
- Brant, V., Neckář, K., Pivec, J., Duchoslav, M., Holec, J., Fuksa, P., Venclová, V., 2009. Competition of some summer catch crops and volunteer cereals in the areas with limited precipitation. *Plant, Soil and Environment* 55, 17–24.
- Brant, V., Pivec, J., Fuksa, P., Neckář, K., Kocourková, D., Venclová, V., 2011. Biomass and energy production of catch crops in areas with deficiency of precipitation during summer period in central Bohemia. *Biomass and Bioenergy* 35, 1286–1294. doi:10.1016/j.biombioe.2010.12.034
- Brozović, B., Jug, D., Jurđević, B., Vukadinović, V., Tadić, V., Stipešević, B., 2018. Influence of winter cover crops incorporation on weed infestation in popcorn maize (*Zea mays everta* Sturt.) organic production. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 83, 77–81.
- Brust, J., Claupein, W., Gerhards, R., 2014. Growth and weed suppression ability of common and new cover crops in Germany. *Crop Protection* 63, 1–8. doi:10.1016/j.cropro.2014.04.022
- Büchi, L., Gebhard, C.-A., Liebisch, F., Sinaj, S., Ramseier, H., Charles, R., 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil* 393, 163–175. doi:10.1007/s11104-015-2476-7

- Burket, J.Z., Hemphill, D.D., Dick, R.P., 1997. Winter cover crops and nitrogen management in sweet corn and broccoli rotations. *HortScience* 32, 664-668.
- Burns, D.A., Ciurczak, E.W. 2007 - Handbook of Near-Infrared Analysis 3rd Edition. CRC Press ISBN 9780849373930
- Campiglia, E., Radicetti, E., Mancinelli, R., 2015. Cover crops and mulches influence weed management and weed flora composition in strip-tilled tomato (*Solanum lycopersicum*). *Weed Research* 55, 416-425. doi:10.1111/wre.12156
- Cavalli, D., Cabassi, G., Borrelli, L., Geromel, G., Bechini, L., Degano, L., Marino Gallina, P., 2016a. Nitrogen fertilizer replacement value of undigested liquid cattle manure and digestates. *Eur. J. Agron.* 73, 34-41.
- Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S., McSorley, R., 2006. Green Manure Approaches to Crop Production. *Agronomy Journal* 98, 302. doi:10.2134/agronj2005.0035
- Ciaccia, C., Ceglie, F., Tittarelli, F., Antichi, D., Carlesi, S., Testani, E., Canali, S., 2017. Green manure and compost effects on N-P dynamics in Mediterranean organic stockless systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 17, 751-769. doi:10.4067/S0718-95162017000300015
- Clark, A.J., Meisinger, J.J., Decker, A.M., Mulford, F.R., 2007. Effects of a Grass-Selective Herbicide in a Vetch-Rye Cover Crop System on Nitrogen Management. *Agronomy Journal* 99, 36. doi:10.2134/agronj2005.0361
- Cohan, J.-P., 2011. Crop covers and nitrogen fertilisation of the following crop. Advantage to legume (No. 11), Selected Papers from ARVALIS - Institut du végétal. ARVALIS - Institut du végétal.
- Cohan, J.-P., Castillon, P., 2010. Capacity of cover crops to trap nitrate and to contribute to the nitrogen nutrition of the following crop (No. 9), Selected Papers from ARVALIS - Institut du végétal. ARVALIS - Institut du végétal.
- Collins, H.P., Alva, A., Boydston, R.A., Cochran, R.L., Hamm, P.B., McGuire, A., Riga, E., 2006. Soil microbial, fungal, and nematode responses to soil fumigation and cover crops under potato production. *Biology and Fertility of Soils* 42, 247-257. doi:10.1007/s00374-005-0022-0
- Cook, J.C., Gallagher, R.S., Kaye, J.P., Lynch, J., Bradley, B., 2010. Optimizing Vetch Nitrogen Production and Corn Nitrogen Accumulation under No-Till Management. *Agronomy Journal* 102, 1491. doi:10.2134/agronj2010.0165
- De Neve, S., Hofman, G., 1996. Modelling N mineralization of vegetable crop residues during laboratory incubations. *Soil Biology and Biochemistry* 28, 1451-1457. doi:10.1016/S0038-0717(96)00154-X
- Dorn, B., Stadler, M., van der Heijden, M., Streit, B., 2013. Regulation of cover crops and weeds using a roll-chopper for herbicide reduction in no-tillage winter wheat. *Soil and Tillage Research* 134, 121-132. doi:10.1016/j.still.2013.07.014
- Duiker, S.W., Curran, W.S., 2005. Rye Cover Crop Management for Corn

- Production in the Northern Mid-Atlantic Region. *Agronomy Journal* 97, 1413. doi:10.2134/agronj2004.0317
- Fisher, K.A., Momen, B., Kratochvil, R.J., 2011. Is Broadcasting Seed an Effective Winter Cover Crop Planting Method? *Agronomy Journal* 103, 472. doi:10.2134/agronj2010.0318
- Franzluebbers, A.J., Stuedemann, J.A., 2007. Crop and cattle responses to tillage systems for integrated crop-livestock production in the Southern Piedmont, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems* 22, 168-180. doi:10.1017/S1742170507001706
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Amiotti, N., Quiroga, A., 2017. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system. *Field Crops Research* 214, 104-112. doi:10.1016/j.fcr.2017.08.016
- Frasier, I., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2016. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Science of The Total Environment* 562, 628-639. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.04.058
- Fuksa, P., Hakl, J., Brant, V., 2013. Energy balance of catch crops production. *Zemdirbyste-Agriculture* 100, 355-362. doi:10.13080/z-a.2013.100.045
- Handlířová, M., Procházková, B., Smutný, V., 2016. Yields of Selected Catch Crops in Dry Conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 64, 1139-1148. doi:10.11118/actaun201664041139
- Hartz, T.K., Johnstone, P.R., Miyao, E.M., Davis, R.M., 2005. Mustard cover crops are ineffective in suppressing soilborne disease or improving processing tomato yield. *HortScience* 40, 2016-2019.
- Herrera, J.M., Büchi, L., Rubio, G., Torres-Guerrero, C., Wendling, M., Stamp, P., Pellet, D., 2017. Root decomposition at high and low N supply throughout a crop rotation. *European Journal of Agronomy* 84, 105-112. doi:10.1016/j.eja.2016.12.012
- Herrera, J.M., Feil, B., Stamp, P., Liedgens, M., 2010. Root Growth and Nitrate-Nitrogen Leaching of Catch Crops following Spring Wheat. *Journal of Environment Quality* 39, 845. doi:10.2134/jeq2009.0306
- Herrera, J.M., Liedgens, M., 2009. Leaching and Utilization of Nitrogen During a Spring Wheat Catch Crop Succession. *Journal of Environment Quality* 38, 1410. doi:10.2134/jeq2008.0267
- Jackson, L.E., Wyland, L.J., Stivers, L.J., 1993. Winter cover crops to minimize nitrate losses in intensive lettuce production. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 121, 55-62.
- Jani, A.D., Grossman, J., Smyth, T.J., Hu, S., 2016. Winter legume cover-crop root decomposition and N release dynamics under disking and roller-crimping termination approaches. *Renewable Agriculture and Food Systems* 31, 214-229. doi:10.1017/S1742170515000113

- Jensen, L.S., Salo, T., Palmason, F., Breland, T.A., Henriksen, T.M., Stenberg, B., Pedersen, A., Lundström, C., Esala, M., 2005. Influence of biochemical quality on C and N mineralisation from a broad variety of plant materials in soil. *Plant and Soil* 273, 307–326. doi:10.1007/s11104-004-8128-y
- Justes, E. (Ed.), 2017. *Cover Crops for Sustainable Farming*. Springer Netherlands, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-024-0986-4
- Ketterings, Q.M., Swink, S.N., Duiker, S.W., Czymmek, K.J., Beegle, D.B., Cox, W.J., 2015. Integrating Cover Crops for Nitrogen Management in Corn Systems on Northeastern U.S. Dairies. *Agronomy Journal* 107, 1365. doi:10.2134/agronj14.0385
- Komatsuzaki, M., Waggoner, M.G., 2015. Nitrogen recovery by cover crops in relation to time of planting and growth termination. *Journal of Soil and Water Conservation* 70, 385–398. doi:10.2489/jswc.70.6.385
- Kramberger, B., Lukac, B., Gruskovnjak, D., Gselman, A., 2008. Effects of Italian Ryegrass and Date of Plow-In on Soil Mineral Nitrogen and Sugarbeet Yield and Quality. *Agronomy Journal* 100, 1332. doi:10.2134/agronj2007.0314
- Kulig, B., Lepiarczyk, A., Oleksy, A., Kołodziejczyk, M., 2010. The effect of tillage system and forecrop on the yield and values of LAI and SPAD indices of spring wheat. *European Journal of Agronomy* 33, 43–51. doi:10.1016/j.eja.2010.02.005
- Kunz, Ch., Sturm, D.J., Varnholt, D., Walker, F., Gerhards, R., 2016. Allelopathic effects and weed suppressive ability of cover crops. *Plant, Soil and Environment* 62, 60–66. doi:10.17221/612/2015-PSE
- Kuo, S., Jellum, E.J., 2002. Influence of Winter Cover Crop and Residue Management on Soil Nitrogen Availability and Corn. *Agronomy Journal* 94, 501. doi:10.2134/agronj2002.0501
- Labreuche, J., Laurent, F., Moquet, M., Protin, P.-V., Aubrion, G., 2006. Cover crops. Water protection at an extra cost of 20 to 45 €/ha (No. 3), Selected Papers from ARVALIS - Institut du végétal. ARVALIS - Institut du végétal.
- Lawson, A., Cogger, C., Bary, A., Fortuna, A.-M., 2015. Influence of Seeding Ratio, Planting Date, and Termination Date on Rye-Hairy Vetch Cover Crop Mixture Performance under Organic Management. *PLOS ONE* 10, e0129597. doi:10.1371/journal.pone.0129597
- Lenzi, A., Antichi, D., Bigongiali, F., Mazzoncini, M., Migliorini, P., Tesi, R., 2009. Effect of different cover crops on organic tomato production. *Renewable Agriculture and Food Systems* 24, 92–101. doi:10.1017/S1742170508002445
- Liebman, A.M., Grossman, J., Brown, M., Wells, M.S., Reberg-Horton, S.C., Shi, W., 2018. Legume Cover Crops and Tillage Impact Nitrogen Dynamics in Organic Corn Production. *Agronomy Journal* 110, 1046. doi:10.2134/agronj2017.08.0474

- Macdonald, A.J., Poulton, P.R., Howe, M.T., Goulding, K.W.T., Powlson, D.S., 2005. The use of cover crops in cereal-based cropping systems to control nitrate leaching in SE England. *Plant and Soil* 273, 355-373. doi:10.1007/s11104-005-0193-3
- Mahal, N.K., Castellano, M.J., Miguez, F.E., 2018. Conservation Agriculture Practices Increase Potentially Mineralizable Nitrogen: A Meta-Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 82, 1270. doi:10.2136/sssaj2017.07.0245
- Mancinelli, R., Marinari, S., Brunetti, P., Radicetti, E., Campiglia, E., 2015. Organic mulching, irrigation and fertilization affect soil CO₂ emission and C storage in tomato crop in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 152, 39-51. doi:10.1016/j.still.2015.04.001
- Marcillo, G.S., Miguez, F.E., 2017. Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* 72, 226-239. doi:10.2489/jswc.72.3.226
- Marinari, S., Mancinelli, R., Brunetti, P., Campiglia, E., 2015. Soil quality, microbial functions and tomato yield under cover crop mulching in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 145, 20-28. doi:10.1016/j.still.2014.08.002
- Martina, H., Vojtěch, L., Vladimír, S., 2017. Yield and soil coverage of catch crops and their impact on the yield of spring barley. *Plant, Soil and Environment* 63, 195-200. doi:10.17221/801/2016-PSE
- Miguez, F.E., Bollero, G.A., 2006. Winter Cover Crops in Illinois. *Crop Science* 46, 1536. doi:10.2135/cropsci2005.09.0306
- Mikó, P., 2016. Effect of different N nutrient contents on biomass of green manure as second crop, under unfavorable climate conditions in Hungary. *Applied Ecology and Environmental Research* 14, 309-324. doi:10.15666/aeer/1403_309324
- Osipitan, O.A., Dille, J.A., Assefa, Y., Knezevic, S.Z., 2018. Cover Crop for Early Season Weed Suppression in Crops: Systematic Review and Meta-Analysis. *Agronomy Journal* 110, 2211-2221. doi:10.2134/agronj2017.12.0752
- Parr, M., Grossman, J.M., Reberg-Horton, S.C., Brinton, C., Crozier, C., 2011. Nitrogen Delivery from Legume Cover Crops in No-Till Organic Corn Production. *Agronomy Journal* 103, 1578. doi:10.2134/agronj2011.0007
- Peter, M., Kovacs, G., Balla, I., Laszlo, V., Gyuricza, C., 2012. Investigation of the biomass and nutrient content of green manuring plants as second crops in Hungary. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 40, 47-52.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., R Core Team, 2019. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-139, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.

- Poepplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33-41. doi:10.1016/j.agee.2014.10.024
- Poffenbarger, H.J., Mirsky, S.B., Kramer, M., Weil, R.R., Meisinger, J.J., Cavigelli, M.A., Spargo, J.T., 2015a. Cover Crop and Poultry Litter Management Influence Spatiotemporal Availability of Topsoil Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 79, 1660. doi:10.2136/sssaj2015.03.0134
- Poffenbarger, H.J., Mirsky, S.B., Weil, R.R., Maul, J.E., Kramer, M., Spargo, J.T., Cavigelli, M.A., 2015b. Biomass and Nitrogen Content of Hairy Vetch-Cereal Rye Cover Crop Mixtures as Influenced by Species Proportions. *Agronomy Journal* 107, 2069. doi:10.2134/agronj14.0462
- Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de Lange, M.N.J., Vallejo, A., Cooper, J.M., 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 174, 1-10.
- Redin, M., Recous, S., Aita, C., Dietrich, G., Skolaude, A.C., Ludke, W.H., Schmatz, R., Giacomini, S.J., 2014. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry* 78, 65-75. doi:10.1016/j.soilbio.2014.07.014
- Ritchie, S.W., Hanway, J.J., Benson, G.O., 1992. How a corn plant grows. Iowa State Univ. Sci. Technol. Coop. Ext. Serv. Rep. 48, 24.
- Rüegg, W.T., Richner, W., Stamp, P., Feil, B., 1998. Accumulation of dry matter and nitrogen by minimum-tillage silage maize planted into winter cover crop residues. *European Journal of Agronomy* 8, 59-69. doi:10.1016/S1161-0301(97)00013-0
- Rühlemann, L., Schmidtke, K., 2016. The suitability of non-legume cover crops for inorganic soil nitrogen immobilisation in the transition period to an organic no-till system. *Plant Production Science* 19, 105-124. doi:10.1080/1343943X.2015.1128098
- Sainju, U.M., Singh, B.P., Whitehead, W.F., 2001. Comparison of the effects of cover crops and nitrogen fertilization on tomato yield, root growth, and soil properties. *Scientia Horticulturae* 91, 201-214. doi:10.1016/S0304-4238(01)00264-3
- Sainju, U.M., Whitehead, W.F., Singh, B.P., Wang, S., 2006. Tillage, cover crops, and nitrogen fertilization effects on soil nitrogen and cotton and sorghum yields. *European Journal of Agronomy* 25, 372-382. doi:10.1016/j.eja.2006.07.005
- Schröder, J.J., de Visser, W., Assinck, F.B.T., Velthof, G.L., 2013. Effects of short-term nitrogen supply from livestock manures and cover crops on silage maize production and nitrate leaching. *Soil Use and Management* 29, 151-160. doi:10.1111/sum.12027

- Schröder, J.J., Schulte, R.P.O., Creamer, R.E., Delgado, A., van Leeuwen, J., Lehtinen, T., Rutgers, M., Spiegel, H., Staes, J., Tóth, G., Wall, D.P., 2016. The elusive role of soil quality in nutrient cycling: a review. *Soil Use and Management* 32, 476-486.
- Seman-Varner, R., Varco, J., O'Rourke, M., 2017. Nitrogen Benefits of Winter Cover Crop and Fall-Applied Poultry Litter to Corn. *Agronomy Journal* 109, 2881. doi:10.2134/agronj2016.11.0670
- Smith, B.C. 1998 - *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach* 1st Edition. CRC Press ISBN 9780849324635
- Spargo, J.T., Cavigelli, M.A., Mirsky, S.B., Meisinger, J.J., Ackroyd, V.J., 2016. Organic Supplemental Nitrogen Sources for Field Corn Production after a Hairy Vetch Cover Crop. *Agronomy Journal* 108, 1992. doi:10.2134/agronj2015.0485
- Stivers-Young, L., 1998. Growth, nitrogen accumulation, and weed suppression by fall cover crops following early harvest of vegetables. *HortScience* 33, 60-63.
- Suarez-Tapia, A., Villamil, M.B., Grabau, L.J., 2014. Evaluation of N sources, cover crops, and tillage systems for corn grown under organic management. *Phyton, International Journal of Experimental Botany* 83, 71-81.
- Tarui, A., Matsumura, A., Asakura, S., Yamawaki, K., Hattori, R., Daimon, H., 2013. Evaluation of Mixed Cropping of Oat and Hairy Vetch as Green Manure for Succeeding Corn Production. *Plant Production Science* 16, 383-392. doi:10.1626/pp.16.383
- Teasdale, J.R., 1996. Contribution of Cover Crops to Weed Management in Sustainable Agricultural Systems. *Journal of Production Agriculture* 9, 475-479. doi:10.2134/jpa1996.0475
- Teasdale, J.R., Mirsky, S.B., Spargo, J.T., Cavigelli, M.A., Maul, J.E., 2012. Reduced-Tillage Organic Corn Production in a Hairy Vetch Cover Crop. *Agronomy Journal* 104, 621. doi:10.2134/agronj2011.0317
- Thomsen, I.K., Hansen, E.M., 2014. Cover crop growth and impact on N leaching as affected by pre- and postharvest sowing and time of incorporation. *Soil Use and Management* 30, 48-57. doi:10.1111/sum.12083
- Thorup-Kristensen, K., Magid, J., Jensen, L.S., 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones, in: *Agronomy*, B.-A. in (Ed.), . Academic Press, pp. 227-302. doi:10.1016/S0065-2113(02)79005-6
- Tonitto, C., David, M.B., Drinkwater, L.E., 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, 58-72. doi:10.1016/j.agee.2005.07.003

- Torbert, H.A., Reeves, D.W., Mulvaney, R.L., 1996. Winter Legume Cover Crop Benefits to Corn: Rotation vs. Fixed-Nitrogen Effects. *Agronomy Journal* 88, 527. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800040005x
- Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Pace, R., Tei, F., Guiducci, M., Thorup-Kristensen, K., 2012. Green manuring effect of pure and mixed barley – hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition. *European Journal of Agronomy* 43, 136–146. doi:10.1016/j.eja.2012.06.004
- Tosti, G., Benincasa, P., Farneselli, M., Tei, F., Guiducci, M., 2014. Barley-hairy vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *European Journal of Agronomy* 54, 34–39. doi:10.1016/j.eja.2013.11.012
- Tribouillois, H., Dürr, C., Demilly, D., Wagner, M.-H., Justes, E., 2016. Determination of Germination Response to Temperature and Water Potential for a Wide Range of Cover Crop Species and Related Functional Groups. *PLOS ONE* 11, e0161185. doi:10.1371/journal.pone.0161185
- Trinsoutrot, I., Recous, S., Bentz, B., Linères, M., Chèneby, D., Nicolardot, B., 2000. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Science Society of America Journal* 64, 918–926.
- Valkama, E., Lemola, R., Känkänen, H., Turtola, E., 2015. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 203, 93–101. doi:10.1016/j.agee.2015.01.023
- Vanden Nest, T., Vandecasteele, B., Ruyschaert, G., Merckx, R., 2014. Incorporation of catch crop residues does not increase phosphorus leaching: a soil column experiment in unsaturated conditions. *Soil Use and Management* 30, 351–360. doi:10.1111/sum.12131
- Vaughan, J.D., Evanylo, G.K., 1998. Corn Response to Cover Crop Species, Spring Desiccation Time, and Residue Management. *Agronomy Journal* 90, 536. doi:10.2134/agronj1998.00021962009000040016x
- Wayman, S., Cogger, C., Benedict, C., Collins, D., Burke, I., Bary, A., 2015. Cover Crop Effects on Light, Nitrogen, and Weeds in Organic Reduced Tillage. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 39, 647–665. doi:10.1080/21683565.2015.1018398
- Webb, J., Sørensen, P., Velthof, G., Amon, B., Pinto, M., Rodhe, L., Salomon, E., Hutchings, N., Burczyk, P., Reid, J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure-N efficiency. *Adv. Agron.* 119, 371–442.
- Workman, J., Weyer L. 2007 - Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy. CRC Press ISBN 1584885947

Xu, X., Thornton, P. E., & Post, W. M. (2013). A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* 22, 737-749.

Zavattaro, L., Monaco, S., Sacco, D., Grignani, C., 2012. Options to reduce N loss from maize in intensive cropping systems in Northern Italy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147, 24-35.



Nel presente volume vengono riferiti i principali risultati ottenuti nel progetto "Gestione agronomica ed ambientale delle cover crop con particolare riferimento alle dinamiche dell'azoto - CoCrop" finanziato nell'ambito dell'Operazione 16.2.01 del Programma di Sviluppo Rurale 2014-2020 di Regione Lombardia.

ISBN 978-88-908987-6-1



9 788890 898761