

**MANUALE  
OPERATIVO**

# **IL DIGESTATO AGRICOLO PER LA FERTILIZZAZIONE ORGANICA**

**CARATTERISTICHE, MODALITÀ  
E COSTI DI DISTRIBUZIONE**





A cura di Lorella Rossi, Guido Bezzi CIB - Consorzio Italiano Biogas

Con la supervisione e il fattivo contributo del DiSAA Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali dell'Università degli Studi di Milano nelle persone del prof. Marco Acutis e del prof. Marco Fiala.

Un sentito ringraziamento va a CRPA - Soc. Cons. p. A. di Reggio Emilia per aver condiviso le caratteristiche medie dei digestati, attingendo alla loro nutrita banca- dati.  
Riproduzione autorizzata citando la fonte

Gennaio 2024

## **1. LE CARATTERISTICHE QUALITATIVE DEL DIGESTATO AGRICOLO**

- 1.1 IL DIGESTATO AGRICOLO: IL PROCESSO DA CUI DERIVA E LE CARATTERISTICHE AGRONOMICHE
- 1.2 LE CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL DIGESTATO AGRICOLO
- 1.3 LE CARATTERISTICHE IGIENICO-SANITARIE DEL DIGESTATO AGRICOLO
- 1.4 IL DIGESTATO AGRICOLO COME FONTE DI SOSTANZA ORGANICA STABILIZZATA

## **2. LA FERTILIZZAZIONE CON IL DIGESTATO AGRICOLO: APPORTO DI NUTRIENTI E DI SOSTANZA ORGANICA**

- 2.1 IL DIGESTATO AGRICOLO COME FONTE DI NUTRIENTI
- 2.2 IL CICLO DELL'AZOTO E LA SUA GESTIONE AGRONOMICA
- 2.3 EPOCHE E MODALITÀ DI DISTRIBUZIONE: EFFICIENZA DELL'AZOTO DISTRIBUITO
- 2.4 IL DIGESTATO AGRICOLO IN AGRICOLTURA BIOLOGICA

## **3. ATTREZZATURE E SISTEMI INNOVATIVI PER LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO**

- 3.1 LE CRITICITÀ CONNESSE ALLA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO AGRICOLO
- 3.2 LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO LIQUIDO: LA FASE DI TRASPORTO E LA FASE DI DISTRIBUZIONE
- 3.3 I SISTEMI AVANZATI DI DISTRIBUZIONE
  - 3.3.1 ATTREZZATURE E SISTEMI PER L'INTERRAMENTO
  - 3.3.2 ATTREZZATURE E SISTEMI PER LA DISTRIBUZIONE SUPERFICIALE
  - 3.3.3 FERTIRRIGAZIONE CON DIGESTATO
- 3.4 LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO PALABILE

## **4. CONSIGLI DI CONCIMAZIONE CON DIGESTATO AGRICOLO**

- 4.1 MAIS, SORGO
- 4.2 CEREALI AUTUNNO-VERNINI
- 4.3 PRATI DI GRAMINACEE
- 4.4 ERBA MEDICA
- 4.5 SOIA E ALTRE LEGUMINOSE DA GRANELLA
- 4.6 BARBABIETOLA DA ZUCCHERO
- 4.7 POMODORO DA INDUSTRIA
- 4.8 FRUTTETI E VIGNETI

## **5. LA CONCIMAZIONE DEL MAIS CON "DIGESTATO EQUIPARATO"**

- 5.1 PREMESSA E IMPOSTAZIONE GENERALE
- 5.2 ESEMPIO DI FERTILIZZAZIONE DEL MAIS CON DIGESTATO "EQUIPARATO" IN AREA VULNERABILE AI NITRATI

## **6. CARATTERISTICHE TECNICHE E COSTI DI DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO CON CANTIERI INNOVATIVI**

- 6.1 FASE DI TRASPORTO
- 6.2 FASE DI DISTRIBUZIONE IN CAMPO
- 6.3 LA CAPACITÀ OPERATIVA E LA CONFIGURAZIONE DEL CANTIERE
- 6.4 I COSTI DI ESERCIZIO DEI CANTIERI INNOVATIVI
  - 6.4.1 CANTIERE A1: CARRO SPANDILIQUAME PER TRASPORTO E DISTRIBUZIONE
  - 6.4.2 CANTIERI B1 E B2: DISTRIBUZIONE CON CARRO SPANDILIQUAME TRAINATO
  - 6.4.3 CANTIERI C1 E C2: DISTRIBUZIONE CON SPANDILIQUAME SEMOVENTE
  - 6.4.4 CANTIERE D: DISTRIBUZIONE CON COLTIVATORE OMBELICALE
- 6.5 CRITERI DI CONFRONTO E VALUTAZIONE DEI CANTIERI

## **7. NOTE E BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE CONSULTATA**

AZIONE

4.

## FERTILIZZAZIONE ORGANICA

**UTILIZZARE DIGESTATO PER RESTITUIRE NUTRIENTI AL SUOLO E RIDURRE L'USO DI FERTILIZZANTI CHIMICI**

**SENZA FERTILIZZAZIONE ORGANICA**

GRANDE USO DI FERTILIZZANTI CHIMICI

COLTIVAZIONE MENO RIGOGLIOSA E PIÙ SOGGETTA A STRESS

SUOLO COMPATTO, MENO LAVORABILE E POCO FERTILE

VITALITÀ DEL SUOLO MOLTO RIDOTTA

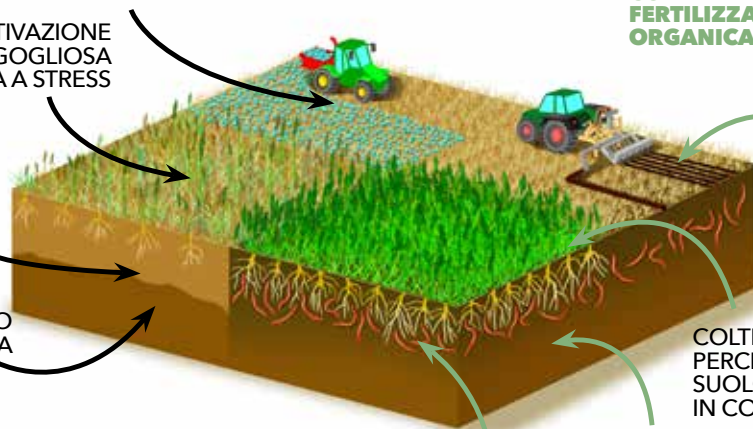
**CON FERTILIZZAZIONE ORGANICA**

FERTILIZZAZIONE CON DIGESTATO

COLTIVAZIONE RIGOGLIOSA PERCHÉ DISPONE DI UN SUOLO IN CONDIZIONI OTTIMALI

SUOLO POROSO, FACILMENTE LAVORABILE E RICCO DI FERTILITÀ

PIÙ VITA E BIODIVERSITÀ NEL SUOLO



FARMING  
FOR  
FUTURE

**LA FERTILIZZAZIONE ORGANICA AUMENTA LA FERTILITÀ DEL SUOLO, REGOLA I CICLI DEI NUTRIENTI E DELL'ACQUA, AUMENTA LA RESILIENZA AGLI EVENTI ESTERNI E INCREMENTA LA BIODIVERSITÀ.**

**10 AZIONI PER COLTIVARE IL FUTURO.**

## PRESENTAZIONE

Nella filiera del biogas e biometano agricolo, la gestione efficiente del digestato è un aspetto fondamentale perché il suo ritorno al suolo è il fattore che determina l'effettiva chiusura dei cicli biologici dell'azienda agricola (in primis quello del carbonio), rendendola virtuosa, grazie al regolare ritorno della sostanza organica al suolo e al riciclo dei nutrienti. Lo stoccaggio del carbonio organico nel terreno, infatti, è una delle forme più virtuose di riduzione della CO<sub>2</sub> in atmosfera: non solo contribuisce a ridurre l'effetto serra ma, al contempo, incrementa la fertilità chimica, fisica e biologica del suolo agrario.

L'adeguata valorizzazione del potere fertilizzante del digestato, dotato di sostanza organica stabilizzata e di nutrienti e la conseguente significativa riduzione dell'uso di concimi chimici, è uno dei pilastri del "Biogasfabbene®", insieme alla valorizzazione di effluenti zootecnici, residui agricoli e sottoprodotti agroindustriali e alla introduzione di colture di secondo raccolto, laddove possibile. L'evoluzione di questo approccio è "Farming for Future: 10 azioni per coltivare il futuro", il progetto ideato e lanciato dal CIB come strumento strategico e indispensabile per promuovere il processo di transizione ecologica dell'attività agricola ([www.farmingforfuture.it](http://www.farmingforfuture.it)) e raggiungere il duplice obiettivo di un'agricoltura più sostenibile capace di produrre di più con meno risorse e, al contempo, di raggiungere il potenziale di sviluppo del settore (6,5 miliardi di metri cubi di biometano al 2030). Con questo Manuale Operativo si intende fare un focus approfondito sul digestato, un importantissimo "sottoprodotto" della produzione di biogas/biometano agricolo, a cui non a caso è stata dedicata una specifica azione di Farming for Future. La nostra volontà è di mettere a disposizione dei produttori uno strumento per imparare a conoscere le potenzialità del digestato e valutarne la gestione più corretta ed efficiente per la propria azienda sotto il profilo agronomico, economico e ambientale.

L'obiettivo ultimo è quello di orientare sempre di più i produttori di biogas/biometano verso l'adozione di sistemi e tecniche di distribuzione in campo innovativi, in grado di garantire la più elevata valorizzazione del potere fertilizzante del digestato e di minimizzare davvero gli effetti ambientali negativi legati al suo uso agronomico.

Piero Gattoni  
*Lodi, gennaio 2024*



# PREFAZIONE

Il ruolo dell'agricoltura è andato ridefinendosi nel corso degli anni, evolvendosi da "semplice" produttore di cibo a fornitore di servizi ecosistemici, svolgendo un ruolo sempre più importante nell'offrire qualità alla vita umana. L'agricoltura oggi deve fornire cibo e sicurezza alimentare, regolazione del clima attraverso la fotosintesi e la cattura del carbonio, incrementare la biodiversità, fornire energia rinnovabile, migliorare la qualità dell'aria e del suolo e offrire paesaggi, risorse con valore culturale e ricreativo. Riconoscere l'agricoltura come fornitore di servizi ecosistemici è fondamentale per sviluppare pratiche agricole sostenibili che tengano conto della salute ambientale e delle esigenze della società. Questa prospettiva olistica può guidare verso un approccio integrato che bilancia la produzione di alimenti con la conservazione degli ecosistemi e la promozione del benessere umano.

Proprio il settore dell'energia rinnovabile di origine agricola ha avuto un grande sviluppo negli ultimi quindici anni. La produzione di biogas in agricoltura offre una soluzione efficiente non solo per generare energia rinnovabile, ma anche per gestire e recuperare i residui agricoli e zootecnici, riducendo le emissioni di gas a effetto serra e promuovendo una gestione più sostenibile dell'agroecosistema riducendo anche la dipendenza dai fertilizzanti chimici.

La produzione di biogas può portare a migliori risultati economici per gli agricoltori, in quanto l'immissione in rete di energia elettrica o di biometano determina un'integrazione del reddito aziendale. Questo non solo migliora la sostenibilità economica delle aziende agricole, ma contribuisce anche alla diversificazione delle fonti di reddito per gli agricoltori. Inoltre, l'installazione e la gestione degli impianti di biogas può creare opportunità di lavoro locali.

È evidente, tuttavia, che l'efficacia della produzione di biogas come mitigatore del cambiamento climatico dipende dalla scala dell'operazione, dalla corretta gestione dell'impianto e dalla sua integrazione con altre pratiche agricole sostenibili. La promozione e l'adozione di queste tecnologie richiedono spesso il supporto di politiche governative, incentivi, consapevolezza ed elevati livelli di preparazione tecnica degli agricoltori.

In conclusione, la produzione di biogas e biometano in agricoltura rappresenta una soluzione multifunzionale, contribuendo non solo alla produzione di energia rinnovabile, ma anche alla riduzione delle emissioni di gas serra, alla promozione della sostenibilità economica e occupazionale nelle comunità agricole e al progresso verso un modello agricolo più sostenibile dal punto di vista ecologico. Oggi, ogni informazione di tipo tecnico, di facile comprensione e di elevato valore pratico risulta, quindi, particolarmente necessaria per un miglioramento dell'ambiente e dell'attività agricola, quindi questo manuale sarà molto apprezzato da tutti coloro che si occupano di digestione anaerobica e potrà, quindi, essere un importante punto di riferimento tecnico.

Marco Acutis  
*Milano, gennaio 2024*

# PREMESSA

Prima di illustrare gli obiettivi di questo testo, preme chiarire che il digestato di cui si parlerà nel prosieguo è quello generato in impianti di digestione anaerobica alimentati con biomasse non classificate come "rifiuto" ai sensi della Parte Quarta del D.Lgs. 152/06, quali effluenti zootecnici, colture e residui colturali e sottoprodotti agroindustriali vegetali e animali, gestiti come "sottoprodotti" ai sensi dell'art. 184 bis della stessa Parte Quarta. In altre parole, si tratta del digestato che deriva dalle biomasse previste dall'art. 22 del Decreto 5046 del 25 febbraio 2016 e che rientra nella definizione di "digestato agrozootecnico" o di "digestato agroindustriale" di cui all'art. 22 dello stesso decreto, che ne regola a tutti gli effetti l'uso agronomico. D'ora in poi, per semplicità, il digestato da "biomasse non-rifiuto" sarà qui denominato "digestato agricolo".

Di digestato se ne sente parlare ormai da anni, tuttavia alcuni aspetti sono ancora poco noti o comunque sottovalutati in relazione alla effettiva capacità di sostituire la concimazione chimica riducendo, al contempo, l'impatto ambientale dell'operazione fertilizzazione nel suo complesso.

Pertanto, l'obiettivo di questo Manuale non mira tanto ad affrontare le modalità di stesura di un Piano di Utilizzazione Agronomica (PUA) secondo il DM 25.02.2016, ma intende porre l'attenzione sui seguenti aspetti:

- illustrare le caratteristiche agronomiche del digestato e delle sue frazioni, sia in termini di contenuto di nutrienti, sia di qualità della sostanza organica;
- ricordare le peculiarità del ciclo dell'azoto, l'elemento principe nella definizione dei dosaggi, e gli accorgimenti e le tecniche per minimizzarne le perdite (sia in aria per volatilizzazione dell'ammoniaca, sia in acqua per lisciviazione dei nitrati) e per massimizzarne l'effetto fertilizzante;
- descrivere sinteticamente tecniche e tecnologie per la distribuzione in campo, ma limitatamente a quelle soluzioni innovative che consentono di perseguire i benefici di cui al punto precedente;
- fornire consigli di concimazione per le principali colture ricorrendo a tecniche innovative;
- affrontare i costi di questi cantieri innovativi per orientare l'agricoltore nel fare le scelte più opportune in relazione al proprio contesto aziendale.

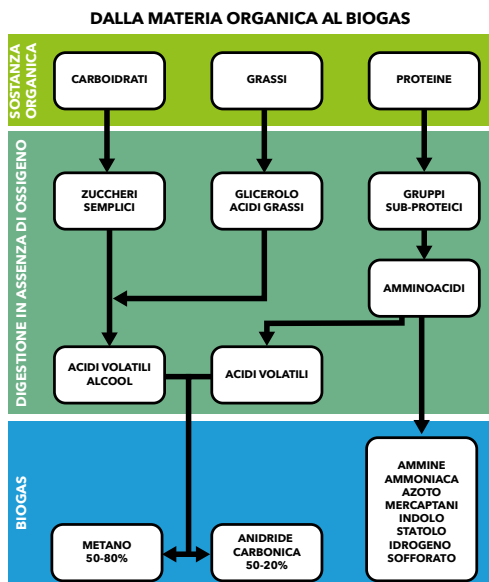
# 1. LE CARATTERISTICHE QUALITATIVE DEL DIGESTATO AGRICOLO

## 1.1 IL DIGESTATO AGRICOLO: IL PROCESSO DA CUI DERIVA E LE CARATTERISTICHE AGRONOMICHE

Nell'impianto di digestione anaerobica, le biomasse agricole e agro-industriali in ingresso sono degradate per via biologica e i prodotti che si ottengono sono:

- il biogas - il prodotto principale costituito essenzialmente da CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> avviato a valorizzazione energetica con produzione di energia elettrica e calore - oppure il biometano, destinabile ai trasporti o ad altri usi in sostituzione di fonti fossili;
- il digestato, un materiale che, rispetto alle biomasse di partenza, si presenta omogeneo con un tenore di umidità più elevato in quanto parte della sostanza secca è stata degradata dai batteri metanigeni. La sostanza organica che rimane risulta più stabile e contiene gli elementi della fertilità, quali azoto, fosforo e potassio, derivanti dalle matrici in ingresso. La sua destinazione ottimale è il ritorno al suolo per preservarne la fertilità e per fornire nutrimento alle colture.

Il processo biologico di digestione anaerobica si innesca "spontaneamente" grazie all'assenza di ossigeno garantita all'interno dei digestori. La degradazione della sostanza organica avviene per opera di diverse specie di batteri anaerobi; le fasi del processo sono sostanzialmente tre, sintetizzate nel prospetto a sinistra (**Figura 1**).



**Figura 1** - Rappresentazione schematica delle fasi che caratterizzano il processo biologico di digestione anaerobica.

In termini generali, se si analizza la composizione chimico-fisica media dei digestati tal quali di varia origine (**Tabella 1**), si può osservare che il tenore di sostanza secca o solidi totali (ST) può variare in media tra il 4-5% e il 10% circa, a seconda delle matrici caricate e delle peculiarità dell'impianto (quantità di colture nella dieta, riciccoli, tempo di ritenzione). Il contenuto di azoto totale si aggira su valori di 4-7 kg per tonnellata; di questo mediamente poco più del 50% è presente in forma ammoniacale. Il contenuto di fosforo è pari a circa 1 kg/t, mentre quello di potassio è più elevato, pari a circa 4-5 kg/t.

Frequentemente, negli impianti agricoli, il digestato è sottoposto a separazione solido/liquido con produzione di due frazioni, quella palabile e quella chiarificata (**Figura 2**). I motivi di tale scelta sono diversi: possibilità di riciclare la frazione liquida, impedire

**Tabella 1** - Digestati agricoli tal quali

Digestato tal quale	pH	Solidi Totali	Solidi Volatili	TOC	Azoto - NTK	C/N	N ammoniacale	Fosforo - P	Potassio - K
Unità di misura	(-)	(%)	(% ST)	(% ST)	(kg/t)	(% ST)	(kg/t)	(kg/t)	(kg/t)
<b>MEDIA</b>	7,84	7,73	74,80	44,10	5,22	6,80	2,82	1,04	4,54
<b>DEV.ST.</b>	0,23	1,77	4,10	4,90	1,30	1,90	0,92	0,40	1,13

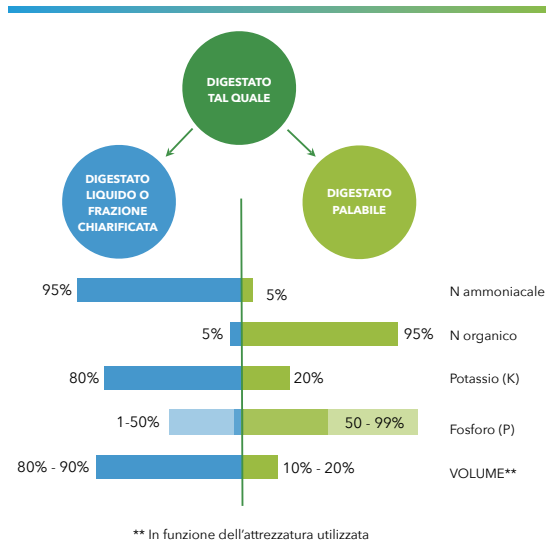
Fonte: Banca dati CRPA.



la formazione di croste superficiali negli stoccaggi, migliorare la gestione delle due frazioni in fase di uso agronomico.

La separazione solido-liquido è solitamente attuata con separatori a compressione elicoidale oppure a rulli contrapposti, mentre è più rara la presenza di centrifughe o nastropresse. Le due frazioni che si generano si presentano con le seguenti caratteristiche:

- **la frazione solida o palabile (Tabella 2)** rappresenta in genere non più del 10 - 15% circa del peso del digestato tal quale ed è caratterizzata da un contenuto di sostanza secca relativamente alto, solitamente superiore al 20% circa. In essa si concentrano la sostanza organica residua, l'azoto organico e il fosforo, seppure con efficienze di separazione variabili in funzione delle condizioni operative di riferimento (tipo di digestato, tipo e modalità d'uso del dispositivo utilizzato);
- **la frazione liquida o chiarificata (Tabella 3)** rappresenta in genere almeno l'85-90% del volume del digestato tal quale ed è caratterizzata da un tenore di sostanza secca mediamente compreso tra il 3 e il 7%. In essa si concentrano i composti solubili, tra cui l'azoto in forma ammoniacale, che può arrivare a rappresentare sino al 60-70% dell'azoto totale presente.



\*\* In funzione dell'attrezzatura utilizzata  
**Figura 2** - Ripartizione dei nutrienti tra le due frazioni, palabile e liquida, ottenute dalla separazione meccanica del digestato tal quale.

**Tabella 2** - Frazioni palabili da digestati agricoli

Digestato palabile	pH	Solidi Totali	Solidi Volatili	TOC	Azoto - NTK	C/N	N ammoniacale	Fosforo - P	Potassio - K
Unità di misura	(-)	(%)	(% ST)	(% ST)	(kg/t)	(% ST)	(kg/t)	(kg/t)	(kg/t)
<b>MEDIA</b>	8,70	25,72	87,00	46,70	6,32	2,50	1,79	2,28	3,89
<b>DEV.ST.</b>	0,29	6,74	5,10	5,40	1,74	0,70	0,90	1,08	1,33

Fonte: Banca dati CRPA.

**Tabella 3** - Frazioni liquide da digestati agricoli

Digestato liquido	pH	Solidi Totali	Solidi Volatili	TOC	Azoto - NTK	C/N	N ammoniacale	Fosforo - P	Potassio - K
Unità di misura	(-)	(%)	(% ST)	(% ST)	(kg/t)	(% ST)	(kg/t)	(kg/t)	(kg/t)
<b>MEDIA</b>	7,93	4,79	66,00	38,90	3,96	8,30	2,26	0,67	3,62
<b>DEV.ST.</b>	0,28	1,53	7,20	5,40	1,38	2,70	0,99	0,39	1,13

Fonte: Banca dati CRPA.

Premesso che, ai fini dell'uso agronomico, è necessario e utile caratterizzare periodicamente il digestato e le sue frazioni per conoscerne il reale potere fertilizzante, in sintesi si può osservare che:

- le frazioni palabili hanno una maggiore dotazione di sostanza organica o solidi volatili, una dotazione di azoto sotto forma essenzialmente organica e un rapporto N/P spostato a favore del secondo elemento;
- le frazioni chiarificate hanno una minore dotazione di sostanza organica, una dotazione di azoto rappresentata per oltre il 45-50% da azoto ammoniacale e da un rapporto N/P spostato a favore del primo elemento

## 1.2 LE CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL DIGESTATO AGRICOLO

La qualità ambientale del digestato agricolo, così come precisato in premessa, è garantita a monte dalla totale assenza di rifiuti tra le matrici in ingresso agli impianti; questo permette di fare le seguenti considerazioni:

- è garantita in primo luogo la totale assenza di plastiche, vetri o altri inerti, in quanto assenti nelle biomasse ammesse in ingresso all'impianto;
- il contenuto di metalli pesanti, è strettamente correlato a quello naturalmente presente nelle singole biomasse. Mediamente le concentrazioni rilevate sono ampiamente al di sotto dei limiti massimi ammessi per il digestato agroindustriale secondo il Decreto 25.02.2016 (**Tabella 4**); l'elemento che più tende ad avvicinarsi al valore limite è lo zinco, solitamente correlato a una significativa presenza nella dieta dell'impianto di liquami zootecnici, suini e avicoli in particolare;
- in merito alla potenziale presenza di altri inquinanti, quali gli inquinanti organici persistenti (AOX, IPA, NPE DEHP, PCB, Diossine/Furani), indagini mirate svolte da alcune ASL (v. Bibliografia) hanno evidenziato che le concentrazioni sono solitamente sotto il limite di rilevanza.

In relazione alle **emissioni di gas serra (soprattutto CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) e di ammoniaca** sono stati più volte verificati i positivi effetti della gestione anaerobica sugli effluenti zootec-

**Tabella 4** - Contenuto di metalli pesanti in digestati agricoli di varia natura (senza distinzione tra agrozootecnico e agroindustriale) prelevati in numerosi impianti di biogas operativi nel periodo 2015-2022 e dislocati su tutto il territorio nazionale.

Elemento	Banca dati CRPA	Banca dati CIB SERVICE (Progetto AGRIHUB)	Decreto n. 5046 del 25.02.2016
	MEDIA, Dev. Std (mg/kg ST)	MEDIA, Dev. Std (mg/kg ST)	Limiti per digestato agroindustriale (mg/kg ST)
<b>Rame - Cu</b>	52 ± 30,2	72 ± 64,68	≤ 230
<b>Zinco - Zn</b>	262 ± 166	346 ± 179	≤ 600
<b>Nichel - Ni</b>	9,20 ± 7,60	13,52 ± 9,40	≤ 100
<b>Piombo - Pb</b>	1,60 ± 0,95	1,90 ± 1,24	≤ 140
<b>Mercurio - Hg</b>	< 0,10	0,42 ± 0,15	≤ 1,50
<b>Cadmio - Cd</b>	0,23 ± 0,12	0,35 ± 0,19	≤ 1,50
<b>Cromo esavalente - CrVI</b>	< 0,10	< 0,10	≤ 0,50

Fonte: Banca dati CRPA e banca dati CIB Service

nici tal quali. Nell'allevamento zootecnico, la gestione degli effluenti (dai ricoveri degli animali sino al loro accumulo negli stoccaggi) è una delle principali fonti di emissioni di metano e di protossido d'azoto a causa dell'elevata fermentescibilità della sostanza organica che contengono. L'avvio, quanto più possibile immediato, delle deiezioni ai digestori per massimizzare la produzione di biogas, di fatto, si traduce in una netta riduzione delle emissioni dalla successiva fase di stoccaggio del digestato.

Non solo, questo si traduce anche in un netto miglioramento delle condizioni ambientali generali sia all'interno dei ricoveri che nell'ambiente circostante (riduzione dell'impatto odorogeno ed emissivo dell'allevamento nel suo complesso).

Per quanto concerne le **emissioni di ammoniaca**, è essenziale che le misure per ridurle siano applicate a tutte le fasi del processo di allevamento; in caso contrario, l'azoto trattenuto (convertitosi tra l'altro, in parte, in forma ammoniacale), a causa del pronto invio al digestore degli effluenti, rischia di disperdersi in modo significativo sotto forma di ammoniaca nella fase successiva di stoccaggio e uso agronomico.

**Le modalità di stoccaggio e di distribuzione in campo** diventano quindi di fondamentale importanza per completare il percorso gestionale ottimale che porta oltre che, come detto, a minimizzare l'impatto ambientale causato dalla gestione delle deiezioni zootecniche, anche a massimizzare il loro potere fertilizzante. Per tali ragioni, le modalità ottimali di spandimento in campo del digestato sono il cuore di questo manuale.

Per lo **stoccaggio del digestato** è pratica diffusa, anche a seguito di specifiche prescrizioni regionali, ricorrere a contenitori a basso rapporto superficie/volume e/o completi di coperture sia fisse che flottanti.

Tuttavia, a partire dal 2018, data di entrata in vigore della legislazione a supporto della produzione di biometano per i trasporti<sup>1</sup>, è emersa l'importanza di prevedere **una vasca di stoccaggio non solo coperta, ma con recupero di biogas, di volume tale da contenere la produzione di digestato di almeno 30 giorni**. Così facendo si riducono in modo netto le emissioni di CH<sub>4</sub> residuali e si valorizza un'ulteriore quota di biogas per la produzione energetica. Una siffatta copertura consente anche di ridurre in modo netto le emissioni di ammoniaca.

I vantaggi ambientali legati alla presenza di un primo stoccaggio coperto, con recupero di biogas, per i primi 30 giorni, sono risultati di una tale importanza ai fini della sostenibilità complessiva del biometano come bioenergia che nella più recente legislazione di settore è diventato un obbligo di legge<sup>2</sup>.

### 1.3 LE CARATTERISTICHE IGIENICO-SANITARIE DEL DIGESTATO AGRICOLO

Sono numerose le evidenze scientifiche relative a diverse tipologie di digestati ottenuti a partire da biomasse più o meno contaminate che dimostrano che la digestione anaerobica, pur condotta in condizioni di mesofilia, non solo non peggiora la qualità igienico-sanitaria dei materiali trattati, ma, al contrario, la migliora. L'entità della riduzione della carica patogena è variabile in quanto correlata a numerosi aspetti, tra cui lo specifico microorganismo in gioco (alcuni sono più resistenti di altri), le modalità gestionali (tempi di ritenzione, efficienza del processo), il livello iniziale di contaminazione.

Per quanto concerne il regime di temperatura adottato, rispetto alle condizioni mesofile, con la digestione anaerobica in termofilia (50-55 °C) si raggiunge in tempi più rapidi un livello più spinto di igienizzazione rispetto al livello iniziale. In condizioni termofile l'inattivazione della carica patogena è determinata dalla resistenza intrinseca al calore delle singole specie, dallo stress ambientale indotto dalla matrice (pH, elettroliti, ecc.) e dal tempo di ritenzione.

In condizioni mesofile, invece, la temperatura non è direttamente responsabile dell'inattivazione dei patogeni; in tali condizioni, i principali fattori responsabili della riduzione della vitalità dei batteri enterici sono la competizione microbica, la concentrazione di ammoniaca e di acidi grassi, i valori di pH e, nel complesso, un'elevata efficienza del processo di digestione. In termini pratici, quindi, digestori mesofili con miscelazione efficace che coinvolge tutto il volume utile disponibile e tempi di ritenzione adeguati conseguono risultati più che soddisfacenti.

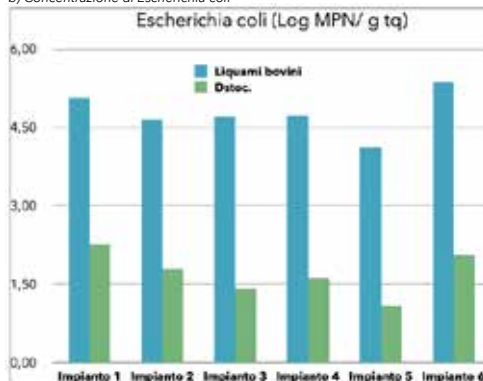
Un ulteriore aspetto da considerare, di notevole importanza per il settore, è l'effetto del tempo di stoccaggio; diversi studi hanno evidenziato il positivo effetto che lo stoccaggio prolungato esercita sullo stato igienico-sanitario del digestato, che risulta ulteriormente migliorato rispetto al digestato "fresco" appena scaricato dai digestori. In sintesi, un efficiente processo di degradazione biologica, unito alla successiva fase di stoccaggio, riduce la carica patogena totale inizialmente presente, garantendo un netto miglioramento dello stato igienico-sanitario complessivo del digestato.

a) Salmonella: campioni positivi al totale esaminato

Campione	LiqB	LetB/SepB	Dstoc
IMP. 1	1/8	0/16	0/8
IMP. 2	1/8	0/8	0/7
IMP. 3	0/7	0/8	0/8
IMP. 4	0/8	0/6	0/12
IMP. 5	0/7	0/9	0/8
IMP. 6	0/8	0/8	0/8
<b>TOTALE</b>	<b>2/46</b>	<b>0/55</b>	<b>0/51</b>

Legenda: LiqB: liquame bovino. LetB/SepB: letame bovino/frazione solida liquame bovino. Dstoc: digestato in stoccaggio

b) Concentrazione di Escherichia coli



Fonte: Rossi L. et al. (2016). Biogas, stato igienico-sanitario dei digestati agrozootecnici. L'Informatore Agrario 43/2016: 50-54

**Figura 3** - Risultati del campionamento ripetuto per la ricerca di Salmonella (a) e di Escherichia coli (b) negli effluenti bovini in ingresso e nei relativi digestati in stoccaggio di 6 impianti di biogas agricoli.

A riprova di quanto sopra (**Figura 3**), diverse indagini, condotte in diversi impianti in scala reale, hanno confermato un quadro del tutto rassicurante e il regolare rispetto del limite imposto dal Decreto 25.02.2026 sia in merito alla Salmonella (che deve risultare “assente”) che a Escherichia coli (peraltro non richiesto per il digestato agricolo).

Se a tale considerazione si aggiungono:

- le diverse prescrizioni e i divieti di spandimento previsti da tempo dalla normativa di settore (dal Codice di Buona Pratica Agricola al Decreto Effluenti in vigore), soprattutto in relazione al sito (distanze da abitazioni, corsi d’acqua, ecc.), alla presenza, al momento della raccolta, di colture in campo (foraggiere, orticole);
- l’adozione di modalità di spandimento adeguate e virtuose rispondenti ai criteri di buona pratica agronomica (distribuzione rasoterra, distribuzione con interrimento contemporaneo o comunque immediatamente successivo);

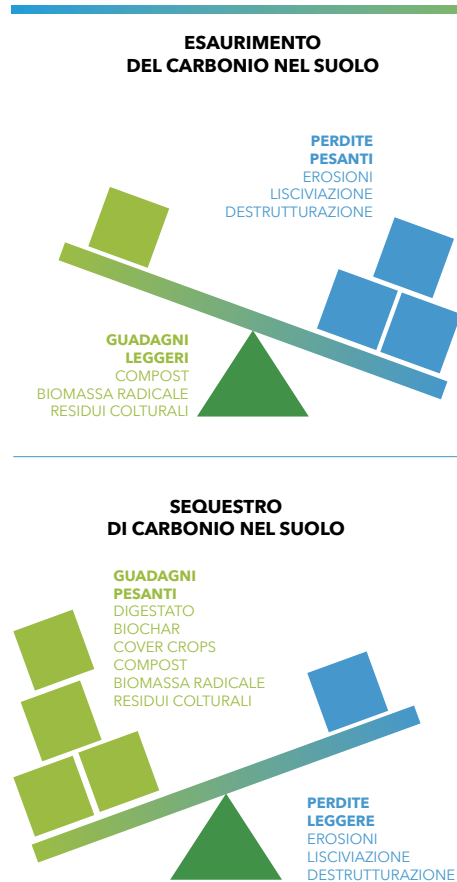
si può affermare che l’uso agronomico del digestato non solo è pienamente compatibile con la produzione di qualunque coltura foraggera o alimentare, comprese quelle di pregio, ma anche che il rischio igienico-sanitario complessivo direttamente correlato a tale operazione è mediamente inferiore rispetto a quello connesso all’uso agronomico degli effluenti zootecnici tal quali.

Da ultimo, ma non per importanza, nonostante il positivo ruolo che la digestione anaerobica esercita anche sul fronte igienico-sanitario, è necessario non sottovalutare la fase di campionamento del digestato; il rischio di ritrovare comunque la Salmonella, anche laddove non attesa per assenza di liquami zootecnici è sempre presente in virtù della sua ubiquitarietà e dei tanti e diversi aspetti che ne condizionano la sopravvivenza.

Ecco perché la fase di campionamento in tutte le sue parti (punto di prelievo, prelievo, trasporto e analisi campione) ricopre un ruolo assolutamente determinante ai fini dei risultati ottenibili; per maggiori dettagli sulla procedura di campionamento si rimanda al “Manuale digestato - Parte prima”, in cui si affronta in modo dettagliato tale aspetto<sup>4</sup>.

### 1.3 IL DIGESTATO AGRICOLO COME FONTE DI SOSTANZA ORGANICA STABILIZZATA

Il sequestro di carbonio nei suoli agricoli, a partire da quelli coltivati, è tra le soluzioni più efficaci di cattura del carbonio atmosferico in quanto, al contempo, migliora la fertilità chimica, fisica e microbiologica dei terreni.



Fonte: farmingforfuture.it

**Figura 4** - Il bilancio positivo del carbonio è l’obiettivo della fertilizzazione organica.

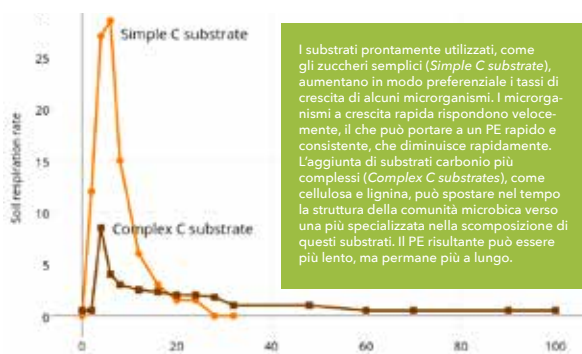
Dopo anni di fertilizzazione prevalentemente chimica a base di NPK, i suoli agricoli si sono impoveriti sino a raggiungere in molti casi, non solo nel meridione d'Italia, ma anche nella fertile Pianura Padana, meno dell'1% di sostanza organica. In questa situazione, l'attività microbiologica è ridotta al minimo e la produzione agricola oltre ad essere completamente dipendente dagli apporti di fertilizzanti esterni, risulta via via decrescente. Il suolo, tuttavia, non è un ambiente confinato in cui la CO<sub>2</sub> viene stoccata in modo permanente sotto forma di carbonio organico; la sostanza organica nel terreno aumenta in funzione dell'entità degli apporti, che a loro volta devono essere maggiori delle inevitabili perdite per naturale respirazione e ossidazione. Per mantenere il carbonio nel suolo il più a lungo possibile, è necessario, quindi, fare in modo che la quantità complessiva di carbonio del sistema coltivato aumenti, da un lato accrescendo l'attività fotosintetica e gli apporti di sostanza organica stabile (digestato), dall'altro riducendo le lavorazioni che ne favoriscono la perdita (**Figura 4**).

In sintesi, è ormai un imperativo passare da tecniche di fertilizzazione basate solo su apporti di elementi chimici in restituzione del fabbisogno della coltura a una tecnica di gestione integrata dei nutrienti da apportare al suolo che consideri anche gli apporti di carbonio, ovvero, privilegiare la concimazione organica.

### Il tipo di carbonio organico

È ormai conoscenza consolidata che le tipologie di sostanza organica che possono essere apportate al suolo abbiano differenti caratteristiche. Per questo, sono differenti gli effetti che il processo di organizzazione comporta: matrici organiche meno complesse,

più ricche di composti come gli zuccheri semplici, se apportate al terreno, generalmente contribuiscono alla riduzione dei livelli di sostanza organica piuttosto che al loro incremento. Si tratta del cosiddetto Priming Effect (PE), ovvero un innalzamento del tasso di decomposizione della sostanza organica del terreno (**Figura 5**) dovuta ad attivazione (o disattivazione nel caso di Priming Effect negativo) di processi microbiologici di sfruttamento e consumo della materia organica.

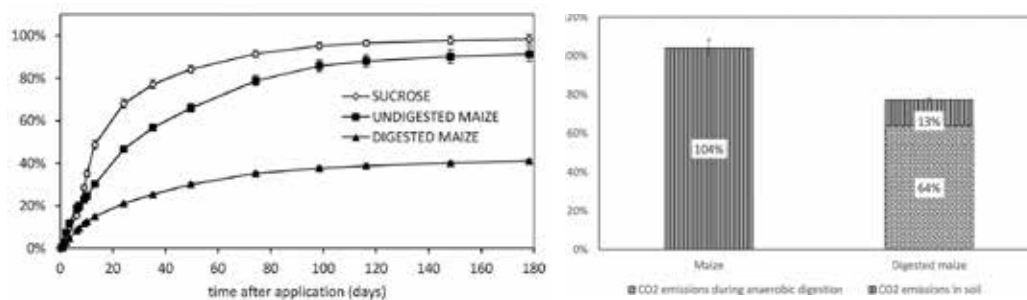


Fonte: Howard Wildman (2016). *The soil priming effect (poster)*. DOI: 10.13140/RG.2.2.28176.81922

**Figura 5** - Incremento della respirazione del suolo con substrati diversi.

Solo recentemente, un'interessante ricerca condotta in Francia (Bégin-Tanneau *et al.*, 2019) ha studiato il Priming Effect del digestato, mettendo a confronto i risultati dovuti all'apporto al terreno agrario di insilato di mais "fresco", e quindi

fermentescibile, rispetto allo stesso trattato in digestore anaerobico di impianto biogas. Mentre l'aggiunta di insilato di mais ha stimolato anche il consumo di sostanza organica già presente nel terreno, conducendo complessivamente ad una perdita netta di carbonio, sotto forma di emissioni di CO<sub>2</sub> nell'arco di 180 giorni, gli apporti di digestato da insilato di mais hanno invece ingenerato un Priming Effect negativo con sequestro di carbonio nel terreno nell'arco dello stesso periodo (**Figura 6**). L'attività microbica del suolo è spesso limitata dalla disponibilità di energia, quando il carbonio del suolo si trova



**Figura 6** - A sinistra: Emissione cumulativa in % di C nel tempo derivata dall'applicazione di diverse matrici organiche al suolo. A destra: Emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera dopo l'apporto al terreno di mais insilato o digestato di mais. (Béghin-Tanneau R. et al., 2019).

prevalentemente in forme complesse (humus stabile) e in condizioni non favorevoli alla mineralizzazione (non lavorazioni). L'aggiunta di substrati carboniosi semplici, specie se accompagnata da arieggiamento dei terreni dovuto a lavorazioni, può, quindi, stimolare un significativo consumo del carbonio, anche in forme più complesse, da parte dei microorganismi del terreno.

Il digestato, proprio in quanto residuo della produzione di biogas, contiene sostanza organica stabilizzata, caratterizzata da un rapporto tra carbonio e azoto (C/N) generalmente molto vicino a quello che di norma si riscontra nel suolo fertile (da 8 a 14). Di conseguenza, il ritorno al suolo di un questo materiale, che contiene carbonio piuttosto recalcitrante alla degradazione e azoto in una proporzione simile a quella che si riscontra nella sostanza organica del suolo, non genera il Priming Effect e la conseguente "fame d'azoto", ma, al contrario, favorisce la formazione di carbonio stabile. In altre parole, il carbonio del digestato, una volta apportato al suolo, è risultato essere molto meno 'labile' di quello di altri substrati organici; questo aspetto saliente si traduce in un indice di umificazione più elevato rispetto ad altre matrici (**Tabella 5**).

Le evidenze sperimentali a favore del digestato rispetto al liquame e alla fertilizzazione chimica non sono numerose; su questo fronte sarebbero necessarie sperimentazioni di lunga durata. Tuttavia, da esperimenti in campo, anche a breve termine o in laboratorio, la superiorità del digestato, tal quale o delle due frazioni, liquida e solida, appare evidente. Schievano *et al.* (2009) hanno evidenziato miglioramenti dal 50 al 75 % di BOD<sub>5</sub>, COD e OD<sub>20</sub> a indicare alta stabilità della sostanza organica dopo il processo di digestione. Cooke *et al.* (2023) indicano una maggior stabilità del carbonio proveniente da digestati (a 180 giorni rimane circa il 70% del carbonio aggiunto) rispetto al letame bovino il cui C aggiunto rimanente è il 50% o ai residui di mais per i quali rimane solo il 25%. Relativamente alle diverse forme di digestato (solido, liquido o tal quale) le differenze sono modeste. Solo un'ulteriore fase di compostaggio può ancora incrementare la stabilità arrivando fino all'80% di C rimasto. Si fa notare, inoltre, che i digestati e i compost hanno migliorato le caratteristiche fisiche del suolo in termini di stabilità degli aggregati rispetto al campione di controllo, al letame e ai residui colturali, con il miglioramento più spiccato generato dalla frazione liquida del digestato. Una conferma dei risultati precedenti

è offerta da Reuland *et al.* (2023) in una prova di laboratorio su suoli con più dell'80% di sabbia. Questa prova ha evidenziato che l'89% del carbonio della frazione solida del digestato era ancora presente nel suolo dopo 92 giorni di incubazione. Analogamente, per il digestato liquido i valori sono risultati in media del 70%, superiori a quelli registrati per il letame (62%) e per gli stocchi di mais tal quali trinciati (50%). È risultata quindi evidente, anche in condizioni che favoriscono la mineralizzazione, l'alta stabilità della sostanza organica del digestato e, in particolare, della frazione solida.

In tre siti Mayerová *et al.* (2023) hanno trovato incrementi del 6% (ma non statisticamente significativo) del contenuto di sostanza organica nello strato 0-30 cm, senza differenze tra digestato da reflui bovini o suini. Si sono registrati, inoltre, significativi incrementi di stabilità degli aggregati, riduzione della densità apparente e aumento della porosità capillare e semi-capillare conseguenti all'impiego dei digestati.

Una recentissima e approfondita review (Andrade Díaz, 2024) ha evidenziato, per i digestati, contenuti di carbonio recalcitrante alla degradazione nei suoli in media del 70% (e ben superiori, ad esempio, a quella dei residui dalla produzione di bioetanolo). Tra le diverse tipologie di digestato, la massima percentuale di carbonio recalcitrante si registra per i reflui da allevamenti avicoli (80%), mentre è da notare una ampia variabilità della percentuale di carbonio recalcitrante nei digestati da liquami suini.

Giannini *et al.* (2023), in un esperimento di campo quadriennale, hanno evidenziato un incremento del carbonio del suolo sempre superiore alla soglia del 4 per mille, sia con digestato, sia con compost. Mentre quest'ultimo ha consentito un accumulo di carbonio leggermente superiore a quello del digestato, ma ha fatto registrare produzioni leggermente inferiori. Anche i trattamenti meccanici di separazione solido liquido possono avere effetto sulla stabilità della frazione solida, con performance inferiori per i separatori a vite rispetto a centrifuga decanter (Egene *et al.*, 2021).

A titolo del tutto indicativo, si riportano, in **Tabella 5**, valori dell'indice di umificazione K1 desunti da bibliografia, da cui risultano indici di umificazione del digestato almeno a livello del letame maturo, se non migliori.

**Tabella 5** - Rapporto C/N e indice di umificazione dei principali materiali destinati all'interamento a scopi fertilizzanti.

	<b>Rapporto C/N</b>	<b>Indice di umificazione (%)</b>
Paglia di cereali	70 - 80	15 - 30
Letame	30 - 40	40 - 50
Letame maturo	25 - 35	55 - 65
Liquame suino	5 - 12	33
Digestato tal quale	8 - 20	70 -79
Biochar	23	91

Fonti diverse, v. Bibliografia



## 2. LA FERTILIZZAZIONE CON IL DIGESTATO AGRICOLO: APPORTO DI NUTRIENTI E DI SOSTANZA ORGANICA

Alla luce delle caratteristiche descritte poco sopra e degli studi sinora condotti, si può affermare con ragionevole certezza che il digestato agricolo è in grado di generare sia effetti positivi sulle colture (apporto di nutrienti, effetto concimante), sia effetti positivi sulla fertilità del suolo (apporto di sostanza organica stabile, effetto ammendante); si tratta di fatto di un materiale in grado di garantire una concimazione completa, anche senza integrazione con concimi minerali.

Ai fini dell'uso agronomico delle frazioni palabile e chiarificata del digestato, è importante sapere che:

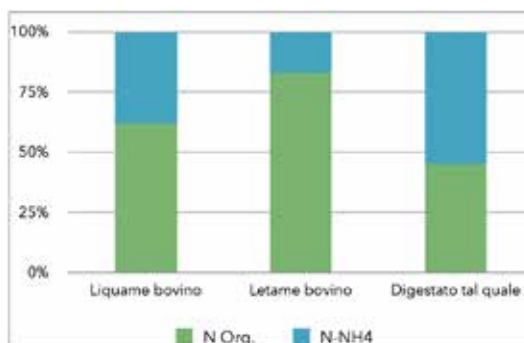
- **la frazione chiarificata**, ben dotata di azoto in forma ammoniacale ha un pronto effetto nutritivo per le colture. Grazie alla più facile infiltrazione nel suolo subito dopo lo spandimento, la distribuzione della frazione chiarificata, in luogo del digestato tal quale, può ridurre le emissioni di ammoniaca in atmosfera; quando il tenore di solidi è abbastanza ridotto, può essere possibile la distribuzione anche senza interrimento o con interrimento poco profondo. Si tratta di un materiale che si presta anche ad un uso in copertura con tecniche di fertirrigazione o nuove tecniche di distribuzione (v. Cap. 3);
- **la frazione solida del digestato**, ben dotata di sostanza organica e di nutrienti, rappresenta un valido sostituto del letame, in quanto contribuisce a mantenere il contenuto di sostanza organica del suolo e in quanto rilascia i nutrienti in modo più graduale. Questa frazione può essere convenientemente utilizzata in pre-aratura su colture da rinnovo o autunno-vernine, oppure in orticoltura e frutticoltura, quando occorre fornire un fertilizzante organico capace, appunto, di cedere lentamente gli elementi nutritivi.

In ogni caso, anche per il digestato agricolo il criterio per stabilire il dosaggio distribuibile per ettaro resta l'azoto ed è a tale elemento che va dedicata la massima attenzione per diversi motivi, a partire dalla sua effettiva quantità per unità di volume.

### 2.1 IL DIGESTATO AGRICOLO COME FONTE DI NUTRIENTI

Come già spiegato nel capitolo precedente, nel digestato si ritrovano tutti gli elementi nutritivi presenti nelle matrici utilizzate nella dieta di alimentazione dell'impianto. La digestione anaerobica, infatti, è un processo biologico che riguarda le catene di carbonio che formano la sostanza organica e genera metano ( $\text{CH}_4$ ) e anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), macro e micro nutrienti restano in toto nel digestato. Per quanto concerne l'azoto, è importante sottolineare che rispetto alla dotazione presente nelle matrici in ingresso, la quantità complessiva resta pressoché invariata, ma aumenta la frazione ammoniacale a scapito di quella organica.

Le quote di azoto organico e ammoniacale che si ritrovano nel digestato sono correlate alla dieta utilizzata per alimentare



**Figura 7** - Ripartizione tra azoto organico e ammoniacale prima e dopo digestione anaerobica in un impianto alimentato a soli effluenti bovini. Valori medi di 12 campionamenti. Fonte: CIB.

il digestore (**Figura 7**), ma non solo: una maggiore presenza di effluenti zootecnici, ad esempio, implica che l'azoto caricato nel digestore sia in forma ammoniacale in quota maggiore, rispetto a una dieta in cui dominano colture e sottoprodotti, caratterizzati da azoto prevalentemente organico.

Per quanto si possano indicare delle caratteristiche medie, è sempre caldamente consigliato campionare regolarmente il digestato del proprio impianto, in quanto la dieta, l'efficienza del processo, le modalità gestionali (riciccoli o meno), le modalità di stoccaggio (durata e copertura o meno, con eventuale recupero di biogas) sono tutti fattori che incidono sulle caratteristiche chimico-fisiche del materiale.

Per far comprendere l'importanza del campionamento e le differenze riscontrabili tra i diversi punti di campionamento in uno stesso impianto, si riportano i risultati del monitoraggio di due impianti in scala reale, che ha visto l'esecuzione di 8 campionamenti nell'arco di 12 mesi, effettuati sempre negli stessi punti e con le stesse modalità (**Tabella 6**).

**Tabella 6** - Caratteristiche medie del digestato tal quale (Dtq), delle frazioni dopo separazione meccanica (Dliq, Dsol) e della frazione liquida in stoccaggio (Dstoc) in due impianti di biogas (valori medi di 8 campionamenti eseguiti in un arco temporale di 12 mesi).

A) Impianto alimentato prevalentemente a colture, sottoprodotti agroindustriali ed effluenti bovini

	Solidi totali - ST [% tal quale] media +/- dev std	Solidi volatili - SV [%ST] media +/- dev std	Azoto totale - NTK [kg/t tq] media +/- dev std	Azoto ammoniacale N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [%NTK] media +/- dev std
<b>Dtq</b>	4,15 ± 0,50	74,04 ± 1,19	3,145 ± 0,800	44,52 ± 7,59
<b>Dliq</b>	3,66 ± 0,52	71,44 ± 1,15	2,94 ± 0,48	46,62 ± 4,66
<b>Dsol</b>	22,75 ± 3,11	91,86 ± 0,93	5,27 ± 0,66	23,63 ± 7,7
<b>Dstoc</b>	1,41 ± 0,75	54,57 ± 8,25	1,33 ± 0,49	61,52 ± 11,83

B) Impianto alimentato con effluenti di bovini da latte (liquame e letame)

	Solidi totali - ST [% tal quale] media +/- dev std	Solidi volatili - SV [%ST] media +/- dev std	Azoto totale - NTK [kg/t tq] media +/- dev std	Azoto ammoniacale N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [%NTK] media +/- dev std
<b>Dtq</b>	6,15 ± 0,48	74,72 ± 0,71	3,42 ± 0,20	51,73 ± 5,07
<b>Dliq</b>	2,94 ± 0,32	67,31 ± 2,17	2,72 ± 0,98	53,00 ± 13,18
<b>Dsol</b>	22,05 ± 1,81	90,93 ± 1,20	4,90 ± 0,48	25,37 ± 4,93
<b>Dstoc</b>	2,06 ± 0,61	60,12 ± 1,61	1,86 ± 0,37	63,81 ± 4,41

Fonte: Relazione finale del progetto BiogasDOP "Effetto della digestione anaerobica applicata a biomasse agro-zootecniche sugli aspetti microbiologici e igienico-sanitari nell'area delle DOP Parmigiano-Reggiano e Grana Padano" a cura di CRPA, finanziato dal MIPAAF, maggio 2016.

Si può osservare quanto segue:

- Il digestato chiarificato in stoccaggio presenta tenori più bassi di sostanza secca, sostanza organica e azoto totale rispetto alla frazione liquida ottenuta a valle del separatore; al contrario, aumenta la quota di azoto ammoniacale. Ciò conferma l'ulteriore stabilizzazione della parte organica che ancora residua nel digestato e l'importanza di prevedere la copertura dello stoccaggio con recupero del biogas per almeno i primi 30 giorni, come imposto dalla recente legislazione di settore<sup>3</sup> per ridurre ulteriormente sia le emissioni di gas a effetto serra (il metano residuale che

ancora si produce), sia le emissioni di ammoniaca.

- Nonostante la diversa dieta dei due impianti, si osservano modeste differenze in termini qualitativi. Fa eccezione la quota di azoto ammoniacale sul totale dell'azoto presente che risulta maggiore (seppure di poco) ed è oggetto di minore variabilità nel caso di impianto alimentato a soli effluenti bovini rispetto a quello in cui dominano colture e sottoprodotti.

L'analisi chimico-fisica del digestato, in altre parole, non deve essere fatta solo per adempiere agli obblighi di cui alle normative regionali di recepimento del Decreto 25.20.2016, ma, soprattutto, per conoscere realmente cosa si porta in campo con l'obiettivo di "fertilizzare" suolo e colture. Per quanto concerne le modalità ottimali per l'esecuzione del campionamento, (v. nota 4).

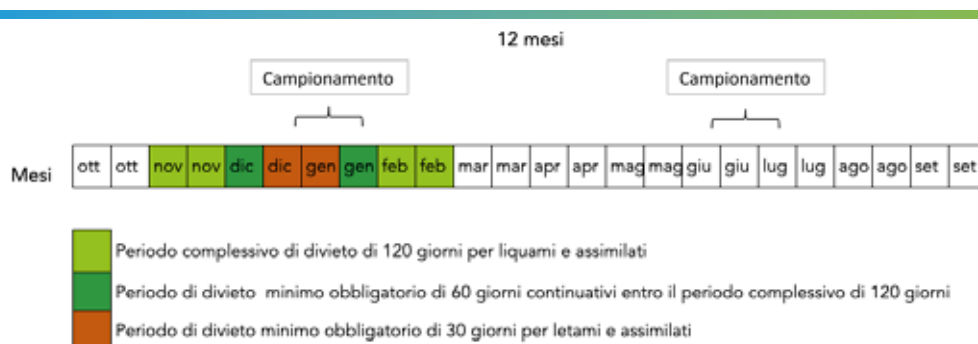
In questa sede, si concentra l'attenzione su quando e quante volte determinare il contenuto di nutrienti e di azoto in particolare nel digestato pronto per la distribuzione in campo. Per stabilire quale possa essere il momento ottimale per procedere al campionamento, questi sono gli elementi di cui tenere conto:

- la dieta prevalente dell'impianto e le sue eventuali variazioni nel corso dell'anno;
- i momenti in cui si concentrano le operazioni di distribuzione in campo;
- i tempi di risposta del laboratorio, in caso di analisi convenzionale e non con metodi rapidi (tecnica NIRS).

Dall'incrocio di questi aspetti, i possibili momenti in cui fare il campionamento possono essere quelli indicati nello schema semplificato illustrato in **Figura 8**.

La corretta determinazione del contenuto di azoto nel digestato è essenziale in quanto è l'elemento che determina i dosaggi distribuibili per ettaro.

Tuttavia, in questa sede è doveroso ed essenziale ricordare che il digestato non apporta

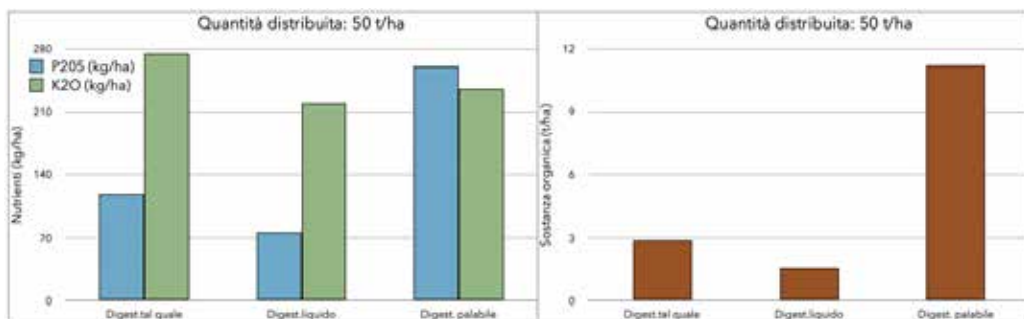


**Figura 8** - Momenti consigliati per il campionamento del digestato, soprattutto in caso di analisi convenzionale per tener conto dei tempi di risposta del laboratorio.

solo azoto, ma anche fosforo e potassio, macroelementi che per loro natura non soffrono di processi di volatilizzazione come l'azoto, ma tendono a "restare" nel digestato e poi nel suolo, una volta distribuito. A titolo esemplificativo, ma comunque utile per capirne l'importanza, in **Figura 9** sono indicate le quantità di  $P_2O_5$  e di  $K_2O$  apportate al suolo con

un dosaggio pari a  $50 \text{ m}^3/\text{ha}$ , ipotizzando le caratteristiche medie del digestato e delle sue frazioni indicate al punto 1.1.

L'apporto di  $\text{P}_2\text{O}_5$  risulta elevato nel caso di digestato solido e, in alcune condizioni,



**Figura 9** - Apporti medi di  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e di sostanza organica con la distribuzione di  $50 \text{ t/ha}$  di digestato (tal quale, palabile e liquido).

potrebbe essere più elevato di quanto richiesto in termini di bilancio dell'elemento. Per quanto riguarda il digestato tal quale e il separato liquido, occorre valutare, caso per caso e sulla base di un piano di concimazione, l'eventuale probabile necessità di apporti aggiuntivi. L'apporto di  $\text{K}_2\text{O}$  risulta elevato in tutti i casi e, in generale, sufficiente per la copertura dei fabbisogni anche delle colture più esigenti in potassio. Infine, è necessario ricordare l'apporto di sostanza organica, ovviamente più elevato nel caso della frazione palabile, ma comunque non trascurabile anche nella frazione liquida.

## 2.2 IL CICLO DELL'AZOTO E LA SUA GESTIONE AGRONOMICA

In un suolo coltivato, l'azoto, indipendentemente dalla sua provenienza, subisce una serie di trasformazioni a catena: una parte dell'azoto è assorbito dalle piante, una parte viene fissato nel suolo stesso e tendenzialmente rilasciato più tardi e una parte è rilasciata in aria (volatilizzazione) e in acqua (percolazione, lisciviazione) (**Figura 10**).

L'obiettivo generale della fertilizzazione azotata è riassumibile in due punti:

- massimizzare la quantità di azoto assorbita dalla coltura;
- minimizzare le perdite di azoto in aria sotto forma di ammoniaca e in acqua sotto forma di nitrati per ruscellamento nelle acque superficiali e lisciviazione in falda.

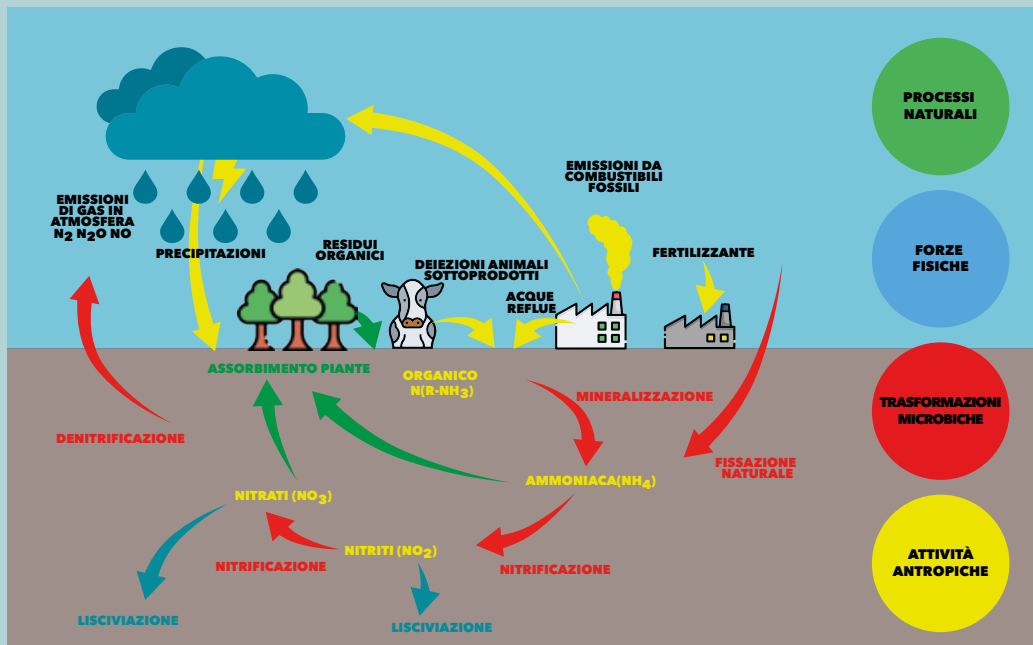
Perseguire entrambi gli obiettivi, ricorrendo alla fertilizzazione organica con materiali di composizione variabile e a bassa concentrazione di nutrienti, come il digestato agricolo, presuppone una maggiore attenzione a numerosi aspetti.

I fattori che influiscono sul destino dell'azoto e, quindi, sull'effettivo potere fertilizzante del materiale distribuito in campo sono molteplici: il tipo di suolo, il tipo di coltura, il clima, la modalità e l'epoca di distribuzione in campo e, non da ultimo, il tipo di fertilizzante in gioco.

In altre parole, si tratta di ottenere la massima efficienza dall'azoto somministrato

a scopo fertilizzante puntando a quella combinazione ottimale dei fattori sopra citati che massimizza la quantità di azoto asportata dalla coltura.

Mentre nel caso di distribuzione di un concime chimico l'effetto dell'azoto è più



**Figura 10** - Il ciclo dell'azoto

L'azoto è il principale componente dell'atmosfera, in forma inerte di  $N_2$ . Tutte le altre forme di azoto sono definite "azoto reattivo" e hanno effetti molto diversificati tra loro e la stessa forma di azoto può avere effetti positivi o negativi (ad esempio, il nitrato può essere assorbito dalle piante consentendo la produzione di nuova biomassa oppure, perso per percolazione in falda, rappresenta un danno ambientale).

Le piante assorbono l'azoto dal terreno, esclusivamente in forma ionica ( $NO_3^-$  e  $NH_4^+$ ) che poi convertono in azoto proteico, indispensabile per la costruzione del corredo enzimatico necessario alla fotosintesi. La presenza, in quantità adeguate, di nitrato e ammonio nel suolo è quindi necessaria per garantire la produttività delle colture. L'azoto minerale si origina dalla degradazione della sostanza organica del suolo governata dall'attività microbica che dipende dalle caratteristiche chimico-fisiche dei suoli. In particolare il passaggio da azoto organico a minerale prevede dapprima la formazione di ammoniaca, che può volatilizzarsi se il processo avviene in superficie; poi, batteri nitrificanti e nitrificanti convertono quest'ultima in nitrati. Il processo di nitrificazione produce  $N_2O$ , gas a forte effetto serra. Infine, anche il processo di denitrificazione, che avviene in condizioni anaerobiche, può produrre  $N_2O$ , in particolare dove il carbonio organico è scarso.

Negli agroecosistemi, la gestione dell'azoto, che peraltro è il principale elemento fertilizzante da apportare, ricopre un ruolo chiave nell'ottenimento di produzioni elevate e qualitativamente interessanti, ma deve essere molto accurata al fine di evitare l'impatto ambientale.

facilmente prevedibile, quando si ricorre al digestato tale prevedibilità si riduce, in ragione della sua composizione più variabile e della più stretta correlazione ad aspetti quali epoca e modalità di distribuzione.

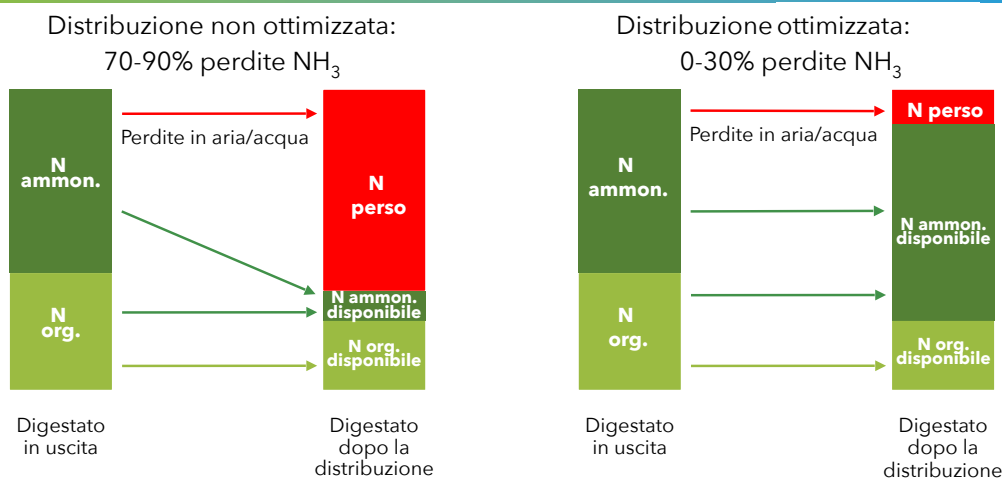
Diverse prove sperimentali hanno evidenziato che l'impiego di digestato può sostituire completamente l'uso dei fertilizzanti chimici consentendo di ottenere almeno gli stessi risultati produttivi (Riva *et al.*, 2016, Kong *et al.*, 2023), in particolare quando, con apposite attrezzature, viene distribuito anche durante il ciclo colturale e non solo in presemina.

Risulta quindi chiara l'importanza degli aspetti sopra indicati, epoca e modalità di distribuzione; è, quindi, a essi che si dedica la maggiore attenzione.

### 2.3 EPOCHE E MODALITÀ DI DISTRIBUZIONE: EFFICIENZA DELL'AZOTO DISTRIBUITO

Per ottimizzarne l'uso agronomico e massimizzarne il reale potere fertilizzante, una volta note le caratteristiche agronomiche peculiari del digestato e delle due frazioni dopo separazione solido/liquido, il passo successivo è quello di valutare l'epoca di distribuzione e la relativa modalità di distribuzione in campo con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza di impiego dell'azoto distribuito e minimizzare le perdite di ammoniaca in atmosfera (**Figura 11**).

Come noto, l'efficienza di impiego dell'azoto apportato è, infatti, strettamente












































**Figura 11** - Effetto delle modalità di distribuzione del digestato sulle perdite di azoto.

correlata alla tecnica e all'epoca di distribuzione. In linea generale, l'efficienza di una concimazione organica dipende dalla possibilità di far coincidere gli apporti con le fasi di maggiore assorbimento dell'azoto da parte delle colture e di maggiore attività microbica del terreno.

Correlando l'epoca di spandimento alla tipologia delle colture, risulta il qua-

**Tabella 7** - Efficienza dell'azoto distribuito sotto forma di materiale liquido in funzione dell'epoca e della modalità di distribuzione.




























































**EPOCA**  PRIMAVERA  ESTATE  AUTUNNO  INVERNO  
**EFFICIENZA**  ALTA  MEDIA  BASSA

COLTURE	MODALITÀ DI DISTRIBUZIONE	EPOCA	LIVELLO DI EFFICIENZA	
			Palabile	Non Palabile
Primaverili estive (es. mais, sorgo, erbai primaverili-estivi)	Su terreno nudo o stoppie prima della preparazione del terreno e semina nell'anno successivo			
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno e semina nell'anno successivo			
	Prima della preparazione del terreno e semina nel medesimo anno			
	In copertura con fertirrigazione			
	In copertura con interrimento			
	In copertura in estate senza interrimento			
Cereali autunno-vernini ed erbai autunno-primaverili	Dopo la raccolta, su terreno nudo, stocchi o stoppie			
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno			
	Presemina			
	In copertura in fase di pieno accestimento			
	In copertura nella fase di inizio-levata			
Colture di secondo raccolto	Presemina	 		
	In copertura con interrimento	 		
	In copertura in fertirrigazione			
	In copertura senza interrimento	 		

segue

2. LA FERTILIZZAZIONE CON IL DIGESTATO AGRICOLO:  
APPORTO DI NUTRIENTI E DI SOSTANZA ORGANICA

**EPOCA**  PRIMAVERA  ESTATE  AUTUNNO  INVERNO  
**EFFICIENZA**  ALTA  MEDIA  BASSA

COLTURE	MODALITÀ DI DISTRIBUZIONE	EPOCA	LIVELLO DI EFFICIENZA	
			Palabile	Non Palabile
Prati di graminacee misti o medicai	Su terreno nudo o stoppie prima della preparazione del terreno e impianto nell'anno successivo			
	Sui residui pagliosi prima della preparazione del terreno			
				
				
	Prima della preparazione del terreno e semina nel medesimo anno			
	Ripresa vegetativa e tagli primaverili			
	Tagli estivi o autunnali precoci			
Tardo autunno (dopo il 15/10)				
Colture arboree compresi vigneti e pioppeti	Preimpianto			
	In copertura in primavera su frutteto inerbito o con interramento			
	In copertura in estate su frutteto inerbito o con interramento			
	In copertura nel tardo autunno (dopo il 15/10)			
	In copertura su frutteto lavorato senza interramento			
Colture ortofloricole comprese erboristiche e aromatiche	Preparazione del terreno			
				
				
	Fertirrigazione	 		
	Copertura senza interramento	 		
				
Copertura con interramento	 			
				

Elaborazione CIB su All. V del DM 25 Febbraio 2016 n.5046 e recepimento dello stesso da parte di Regione Piemonte di cui ad All. 4 bis del Reg. 10/R/2007 e ss.mm.ii.



dro delle efficienze riportato in **Tabella 7**. In pratica, le distribuzioni in vicinanza dell'impianto o nella fase di maggiore richiesta della coltura raggiungono l'efficienza maggiore; quelle effettuate con molto anticipo sortiscono risultati generalmente inferiori.

Dal punto di vista operativo, il momento in cui la distribuzione è più agevole è in concomitanza con la preparazione del terreno, quindi in assenza di coltura; la distribuzione in post emergenza, infatti, richiede il ricorso a mezzi adeguati.

#### **2.4 IL DIGESTATO AGRICOLO IN AGRICOLTURA BIOLOGICA**

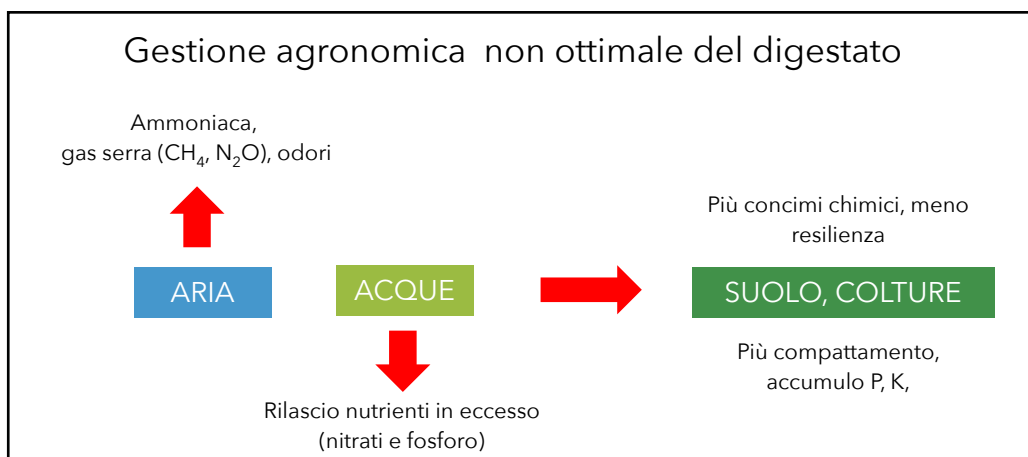
La validità agronomica e ambientale del digestato agricolo è confermata dal fatto che il suo impiego è ammesso anche in agricoltura biologica, come ufficializzato dalle Linee Guida stilate da CIB in collaborazione con FederBio già nel 2018 e revisionate ed aggiornate nel gennaio 2024. In termini generali, nel lungo elenco di sostanze impiegabili per la fertilizzazione in agricoltura biologica citate nell'Allegato II del Reg. UE 2021/1165 compaiono gli effluenti zootecnici e i diversi sottoprodotti agroindustriali vegetali e animali ammessi dal punto di vista formale (v. Decreto 25.02.2016) ed effettivamente impiegati, insieme a colture dedicate, per la produzione del digestato agricolo. Pertanto, in linea di principio, tra le diverse matrici di norma impiegate per produrre il digestato non compaiono sostanze non comprese nell'Allegato II. Il vincolo più stringente resta il divieto di impiego di effluenti zootecnici derivanti da allevamenti industriali.

Per maggiori dettagli si rimanda comunque alle Linee Guida CIB-FederBio recentemente aggiornate<sup>5</sup>.

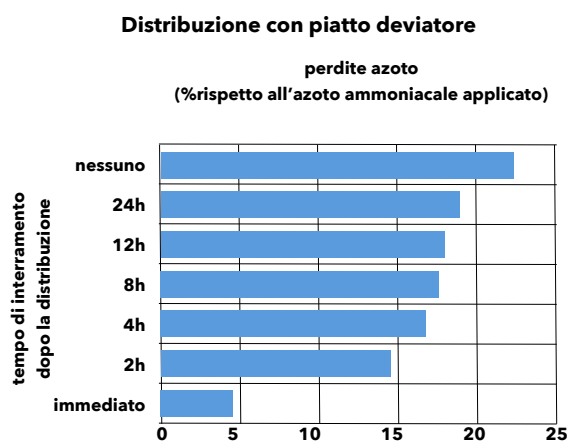
### 3. ATTREZZATURE E SISTEMI INNOVATIVI PER LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO

#### 3.1 LE CRITICITÀ CONNESSE ALLA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO AGRICOLO

Le tecniche di distribuzione in campo influenzano in modo significativo sia l'impatto ambientale, sia l'efficienza nutritiva del digestato come fertilizzante. La distribuzione con i cantieri convenzionali presenta numerose criticità (**Figura 12**), quali: emissioni in atmosfera di ammoniaca, lisciviazione dei nitrati, limitato controllo della dose distribuita, scarsa omogeneità di distribuzione, rischio di compattamento del terreno.



**Figura 12** - Criticità associate a un uso agronomico non efficiente del digestato.



Fonte: Progetto GeSEFFE.

**Figura 13** - Perdite di azoto in forma ammoniacale in relazione al tempo di esposizione del liquame all'aria prima dell'incorporazione.

Le **emissioni di ammoniaca** si verificano in prevalenza nel periodo immediatamente successivo alla distribuzione. Infatti, mentre le perdite di ammoniaca durante la distribuzione sono modeste e limitate a pochi punti percentuali, nelle ore successive di permanenza del materiale sul terreno possono raggiungere fino l'80% del totale somministrato (**Figura 13**). Esse decrescono esponenzialmente nei 3 - 5 giorni successivi allo spandimento e dipendono, oltre che dal tempo di permanenza del digestato sul suolo, da fattori quali il contenuto di sostanza secca, il grado di compattamento del terreno, la presenza di residui vegetali. Altri fattori determinanti l'entità delle emissioni sono la temperatura e la velocità del vento: le perdite risultano massime dai terreni caldi e in periodi ventosi.

**Il compattamento del terreno** è un altro aspetto critico, causato dall'impiego di un unico mezzo per il trasporto e la distribuzione, spesso con elevata capacità per ridurre i costi; per evitare gravi danni alla struttura del terreno, lo spandimento viene limitato a ristretti periodi dell'anno, quelli più asciutti, spesso a scapito dell'efficienza fertilizzante del digestato distribuito.

Anche il **controllo della dose distribuita** per unità di superficie è determinante; dosi eccessive aumentano gli effetti negativi, quali emissioni di ammoniaca in aria e la lisciviazione dei nitrati in falda. Le attrezzature innovative oggi disponibili (v. paragrafo 3.3) sono dotate del cosiddetto "ripartitore di portata", dispositivo che assicura che il flusso erogato di digestato sia ripartito in modo omogeneo a tutti gli organi di distribuzione. In assenza di tali sistemi, solitamente le sole possibilità di gestione della quantità distribuita per evitare dosi eccessive sono il controllo della portata grazie alla regolazione delle pompe volumetriche e la velocità di avanzamento del mezzo (che con certi cantieri non va oltre i 3-4 km/h).

Un altro aspetto importante è **l'omogeneità di applicazione del digestato sul terreno**; l'effettivo apporto di sostanza organica e nutrienti per unità di superficie influenza direttamente gli effetti produttivi del digestato distribuito. I mezzi più diffusi di spandimento, di tipo convenzionale, conseguono una scarsa omogeneità di distribuzione, sia in senso longitudinale che trasversale. L'adozione di pompe volumetriche e/o di ripartitori di portata consente la massima omogeneità di distribuzione. In assenza di dispositivi specifici di regolazione della dose applicata, asperità e cambi di pendenza del terreno, oltre che il livello del liquido all'interno del serbatoio, determinano variazioni, anche notevoli, nella quantità distribuita.

Le criticità sopra elencate sono essenzialmente correlate alla distribuzione superficiale con spandiliquame dotato di piatto deviatore e, ancor più, con getto irrigatore ad alta pressione; si tratta di tecniche destinate ad essere via via abbandonate o, comunque, da utilizzare solo se strettamente necessarie e per volumi modesti.

**Il ricorso a cantieri e sistemi avanzati consente** di effettuare la distribuzione in campo nei momenti in cui è più elevato il fabbisogno delle colture e di perseguire, contemporaneamente, più obiettivi:

- **minimizzare l'impatto ambientale** sulla qualità dell'aria (riduzione delle emissioni di ammoniaca) e delle acque superficiali e di falda (dosaggio adeguato somministrato nel momento più opportuno);
- **allungare il periodo utile di ingresso in campo**, riducendo il rischio di compattamento del terreno;
- **massimizzare il recupero dei nutrienti e dell'azoto in particolare**, grazie a una distribuzione calibrata effettuata nel momento più opportuno per la coltura e in modo omogeneo su tutta la superficie.

Come illustrato poco oltre, il mercato offre ormai numerose soluzioni per ottimizzare l'utilizzo del digestato in relazione alle caratteristiche e alle esigenze aziendali; tutte quante si caratterizzano per la maggiore efficienza di abbattimento delle emissioni di ammoniaca rispetto alla distribuzione superficiale convenzionale, come messo ben in evidenza in

**Tabella 8.**

**Tabella 8** - Efficienza e applicabilità delle diverse tecniche di distribuzione del digestato in relazione alla coltura.

Tecniche di distribuzione	Riduzione emissioni NH <sub>3</sub> (%)	Epoca di distribuzione			
		Presemina, terreno non coltivato	Copertura		
			Sarchiate	Cereali	Prato
<b>Superficiale a bassa pressione - RIFERIMENTO</b>		●	●	●	●
Rasoterra in banda	30 - 35	●	●	●	●
Rasoterra in banda con deflettore	30 - 60	●	●	●	●
<b>Sottosuperficiale</b>					
con dischi (a solco aperto, < 5cm)	70	●	●	●	●
con zappette (a solco chiuso, 5 - 10cm)	80	●	●	N.A.	N.A.
<b>Iniezione profonda (&gt; 15 cm)</b>	90	●	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Incorporazione di materiale applicato in superficie</b>					
con aratura immediata	90	●	N.A.	N.A.	N.A.
con aratura entro le 4 ore	45 - 60	●	N.A.	N.A.	N.A.
con aratura entro le 24 ore	30	●	N.A.	N.A.	N.A.
con coltivazione immediata senza inversione della zolla (minima lavor.)	70	●	N.A.	N.A.	N.A.
<b>Fertirrigazione superficiale</b> (ala piovana, pivot, ranger, ali gocciolanti)	65 - 95	●	●	●	●
<b>Fertirrigazione sub-superficiale</b> (ali gocciolanti interrati)	95 - 100	●	●	●	●

Fonte: Options for Ammonia Mitigation - Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen- Rielaborazione.

**EPOCA DI DISTRIBUZIONE**

CONSIGLIATO



POSSIBILE



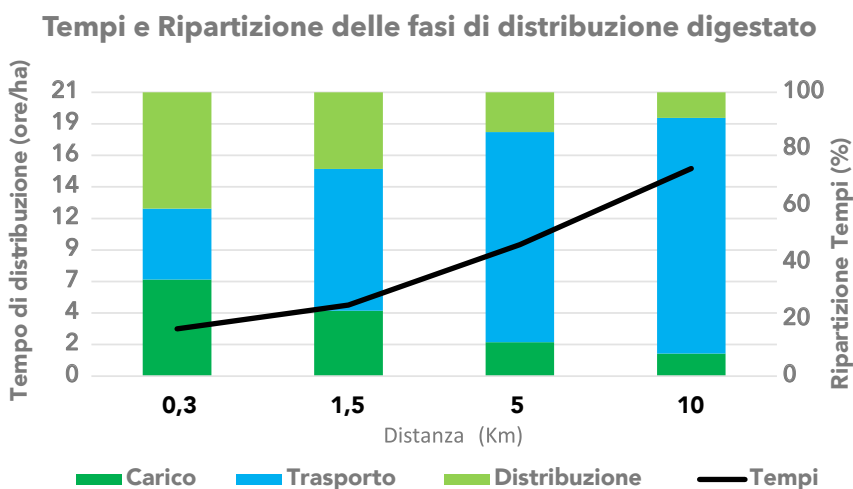
SCONSIGLIATO

N.A. NON APPLICABILE

### 3.2 LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO LIQUIDO: LA FASE DI TRASPORTO E LA FASE DI DISTRIBUZIONE

Per raggiungere appieno gli obiettivi sopra indicati, oltre al ricorso a macchine e attrezzature adeguate in fase di spandimento in campo di cui ai punti successivi, è essenziale, compatibilmente con le caratteristiche di ciascuna azienda separare la fase di trasporto del digestato da quella di distribuzione allo scopo di dedicare i sistemi avanzati di distribuzione alla sola fase di spandimento.

Quando le fasi di carico, trasporto e spandimento sono effettuati con un unico mezzo ci si trova solitamente a dover entrare in campo con mezzi pesanti con il conseguente rischio di compattamento del suolo e di applicazione del digestato in periodi non idonei e con capacità operative ridotte. Inoltre, all'aumentare della distanza dei campi dall'impianto biogas, l'incidenza del trasporto sui tempi operativi e sui costi aumenta considerevolmente (**Figura 14**).



Elaborazione CIB su dati CRPA.

**Figura 14** - Tempi di distribuzione digestato in relazione alla distanza per una botte da 10m<sup>3</sup>.

La separazione della fase di trasporto da quella di distribuzione, quindi, può portare consistenti riduzioni dei costi di gestione, poiché si ottimizzano i tempi operativi, soprattutto man mano che aumenta la distanza dallo stoccaggio (per maggiori dettagli v. Cap. 6). Oltre all'aspetto economico, da valutare sempre in funzione del contesto aziendale di riferimento, la separazione delle fasi permette l'ingresso in campo nei periodi più utili, ovvero in prossimità della semina e/o con colture in atto, cioè in periodi nei quali la somministrazione del digestato ha l'efficienza produttiva più elevata (elevato coefficiente di riciclo dell'azoto e ridotte emissioni).

Le possibili soluzioni per separare o comunque ottimizzare la fase di carico e trasporto dalla distribuzione in campo sono le seguenti (**Figura 15**):

### 3. ATTREZZATURE E SISTEMI INNOVATIVI PER LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO

1. Realizzare vasche o contenitori per digestato con funzione di stoccaggio decentrati: al momento della distribuzione questo consente di ridurre i tempi di trasporto, evitando il ritorno al centro aziendale. Inoltre, il riempimento degli stoccaggi decentrati può essere organizzato in momenti differenti rispetto all'uso in campo così da ottimizzare l'impegno e la gestione dei flussi soprattutto durante i periodi di divieto di distribuzione.
2. Realizzare, anche per singole porzioni della SAU aziendale (tendenzialmente accorpate e collegate direttamente all'area di impianto), reti fisse di trasporto interrato (tubazioni interrato) complete di dispositivi per la movimentazione e miscelazione (pompe, miscelatori) e di sistema di gestione e controllo, adeguatamente progettate e dimensionate.
3. Impiegare vasche o contenitori per digestato (trainato o scarrabile) con funzione di accumulo/alimentatore a bordo campo (il cosiddetto carro balia) al servizio del cantiere di distribuzione in campo per ottimizzare sia la capacità operativa che la fase di trasporto.
4. Ricorrere a semirimorchi cisterna stradali autoportanti di elevata capacità ( $\geq 28 \text{ m}^3$ ) con sistema di carico/scarico, miscelazione e lavaggio interno da impiegare per la rapida alimentazione di vasche e stoccaggi decentrati e/o, talvolta, con la funzione di "balia".

A prescindere dalle sole modalità di trasporto, all'interno dell'azienda, fatta eccezione per



**Figura 15** - Possibili soluzioni per il trasporto ottimizzato del digestato e successiva distribuzione in campo.

il sistema ombelicale poco oltre descritto, l'ingresso in campo ai fini dello spandimento del digestato può avvenire con il classico spandiliquame trainato (carro botte) oppure con lo spandiliquame semovente.

Ad oggi, gli spandiliquame più diffusi sono quelli trainati con serbatoio in pressione che effettuano tutte le operazioni necessarie (carico, omogeneizzazione, scarico); hanno una

capacità di carico compresa tra i 5 e 25-28 m<sup>3</sup> e possono essere corredati del solo piatto deviatore (i modelli più datati e classici) oppure di attrezzature innovative, quali ad esempio i dispositivi per l'interramento completi di ripartitore di portata, pompa volumetrica per applicazioni a rateo variabile, gommatura larga a bassa pressione e analizzatore in continuo della concentrazione di azoto distribuito (NIR) (v. paragrafo 6.2).

Gli spandiliquame semoventi hanno avuto una notevole evoluzione negli ultimi anni; oggi, infatti, il mercato offre macchine altamente specializzate corredate di soluzioni tecnologiche più avanzate in grado di minimizzare i diversi rischi connessi con l'ingresso in campo e massimizzare qualità e produttività del lavoro (**Figura 16**). Tali macchine, di capacità di carico compresa tra i 5 e i 21 m<sup>3</sup>, consentono un grado di precisione e ottimizzazione dell'operazione di distribuzione in campo del digestato del tutto comparabile agli spandiliquame trainati più evoluti; di contro, sono caratterizzati da costi di investimento significativi che impongono un'adeguata valutazione economica (v. Cap. 6).

In ragione della elevata capacità operativa e della elevata qualità del lavoro svolto (controllo e uniformità della dose distribuita, riduzione compattamento), i mezzi semoventi



- Sistema elettronico di controllo del motore e della trasmissione che assicura il funzionamento ai regimi corrispondenti ai più bassi consumi.
- Pneumatici a larga sezione, impianto di gonfiaggio/sgonfiaggio e sistema di disassamento dell'assale posteriore rispetto a quello anteriore per ridurre al minimo il compattamento del terreno in fase di lavoro.
- Presenza del ricevitore satellitare collegato con il computer di bordo per conoscere la posizione e georeferenziare tutti i dati di funzionamento.
- Sistema di guida assistita o semi-automatica per evitare sovrapposizioni o fasce di mancato trattamento, aumentare la produttività di lavoro e ridurre gli stress del conducente.
- Sistema di controllo della dose, sia manuale che automatico tramite mappe di prescrizione per una distribuzione variabile del fertilizzante organico.
- Sistema di distribuzione del digestato (rasoterra o sottosuperficiale) completo di organi a denti o dischi per eseguire anche una minima lavorazione del terreno.

**Figura 16** - Spandiliquame semoventi innovativi: caratteristiche tecnologiche.

sono concepiti unicamente per la fase di distribuzione in campo e non per il trasporto; il cantiere ottimale è infatti quello che prevede la possibilità di riempirsi a bordo campo grazie alla presenza di serbatoi-balia, reti interrante o comunque stoccaggi decentrati. In tale situazione si raggiunge la massima produttività di lavoro del cantiere minimizzando di conseguenza i costi (per maggiori dettagli v. paragrafo 6.4).

### 3.3 I SISTEMI AVANZATI DI DISTRIBUZIONE

Le tecniche per la distribuzione in campo del digestato liquido (tal quale o dopo sepa-

razione solido/liquido) sono diverse e riconducibili alle tipologie sintetizzate di seguito:

- distribuzione superficiale
- distribuzione con interrimento sottosuperficiale o profondo
- fertirrigazione con manichette superficiali o interrate.

La scelta delle tecniche di distribuzione è correlata al fatto che si voglia entrare in campo con la coltura presente (prato o in copertura) oppure con terreno nudo. La presenza della vegetazione rende più complessa la distribuzione, ma, di contro, si riducono le emissioni e si allunga il periodo utile di intervento anche nelle epoche primaverili ed estive.

In assenza di coltura, l'aspetto fondamentale è l'incorporazione che può essere differita rispetto alla distribuzione e abbinata con le lavorazioni del terreno, oppure effettuata in contemporanea attraverso la distribuzione sottosuperficiale o l'iniezione profonda.

#### **3.3.1 ATTREZZATURE E SISTEMI PER L'INTERRAMENTO**

Su terreno nudo, l'interramento del digestato all'atto della distribuzione o differito di poche ore consente di limitare significativamente le emissioni di odori e di ammoniaca durante la distribuzione, con conseguente maggiore efficienza fertilizzante. Come visto precedentemente, è ormai assodato che, con l'interramento, le perdite di azoto ammoniacale si riducono drasticamente anche sino a oltre il 95% poiché non si formano aerosol e scorrimento superficiale.

Nel caso dell'incorporazione differita, l'effetto del tempo che intercorre tra i due interventi è importante in considerazione del fatto che il picco di maggior volatilizzazione del gas è circoscritto nelle prime ore dallo spandimento; i migliori risultati, in termini di riduzione delle emissioni, si ottengono quando l'incorporazione del digestato è effettuata entro 4 ore dalla distribuzione.

I dispositivi per l'interramento possono essere installati su spandiliquame trainato o, in alternativa, essere alimentati da tubazioni avvolgibili e trainate da trattore. A tal proposito, una soluzione sempre più diffusa per la distribuzione su terreno nudo e su prato è il cosiddetto sistema ombelicale, nel quale il collegamento tra lo stoccaggio e il dispositivo distributore avviene mediante una tubazione flessibile e resistente all'abrasione di sviluppo pari o superiore ai 100 m (**Figura 17**).

A seconda del tipo di intervento da effettuare (es.: preparazione in minima lavorazione, su coltura in atto o su prato), gli organi per l'apertura del solco hanno forme e dimensioni



**Figura 17** - Sistemi di distribuzione ombelicale: a sinistra, con interruttore per minima lavorazione; a destra, con ala distributrice rasoterra a bassa pressione su coltura in atto.

diverse (es.: dischi, zappette, assolcatori ad ancora) e ognuno è collegato ai tubi di adduzione del digestato. La profondità di interrimento è solitamente limitata: non oltre i 15-20 cm in minima lavorazione del terreno; 5-10 cm quando si opera su prato. Dal punto di vista tecnico, le diverse proposte tecnologiche sono riconducibili a queste tipologie (**Figura 18**):



- **Sistemi per la distribuzione sottosuperficiale a solco aperto.** Il digestato viene depositato in un solco creato da utensili di vario tipo che, in genere, lavorano a profondità non superiori a 5-6 cm. Gli assolcatori, a lama o a disco singolo o doppio, spazati di 20-40 cm, incidono il terreno e lasciano aperto un profilo poi riempito dal digestato. Questo tipo di distribuzione è applicabile con coltura in atto, essenzialmente su prati e cereali autunno-vermini, anche quando la vegetazione si trova in fase di sviluppo.
- **Sistemi per la distribuzione sottosuperficiale a solco chiuso.** Il digestato viene iniettato a una profondità massima di 15 cm in un solco creato da denti o dischi e, successivamente, coperto da dischi o rulli a valle dell'iniettore. La completa copertura del digestato riduce al minimo le emissioni e gli odori, in modo ancora più efficiente dei sistemi a solco aperto con riduzioni delle perdite di ammoniaca fino all'80-90%. Essendo maggiori la profondità di lavoro e la sezione lavorata, tali sistemi permettono la distribuzione di un dosaggio maggiore. La tipologia di utensili (ad esempio con alette larghe o a zampa d'oca) e la distanza tra loro (da 25-35 cm sino a 45-100 cm) consentono di intervenire in modo efficace ed efficiente sia su terreno nudo, sia su colture sarciate.

Dal momento che le ancore o i coltivatori muovono il terreno, la distribuzione eseguita con tali sistemi può essere considerata come lavorazione ridotta del terreno di tipo conservativo. Per le colture che se ne avvantaggiano, questo significa una drastica riduzione dei costi sia in termini di lavorazioni del terreno che in termini di concimazione.

- **Sistemi per la distribuzione sottosuperficiale a solco chiuso in banda (strip-till).** Il di-



**Figura 18** - Sistemi per la distribuzione sottosuperficiale: a solco aperto (a sinistra e al centro); a solco chiuso (a destra).

gestato viene iniettato a una profondità massima di 15 cm lavorando solo la sezione di suolo in cui sarà seminata la coltura grazie a elementi combinati di denti, dischi e rulli a valle dell'iniettore (**Figura 19**). Oltre alla completa copertura del digestato e conseguente eliminazione di emissioni e odori, questa tecnica consente la localizzazione del digestato, il migliore mantenimento dell'umidità del suolo in relazione alla minore porzione di suolo lavorato e una significativa riduzione delle tempistiche di lavoro e dei consumi. Tuttavia, questa tecnica richiede attrezzature altamente specializzate e dotate, almeno, di guida satellitare.

I principali limiti dell'interramento diretto del digestato rispetto alla distribuzione superficiale sono il limitato periodo utile per l'ingresso in campo e, secondariamente, la mag-



**Figura 19** - Sistemi per la distribuzione sottosuperficiale a solco chiuso in banda (strip-till).

giore potenza richiesta per disporre della necessaria forza di trazione. Il ricorso al sistema ombelicale, tuttavia, aiuta ad ampliare il periodo utile di accesso agli appezzamenti anche in condizioni difficili. Una soluzione alternativa all'interramento diretto, seppur sicuramente meno efficiente, è rappresentata dalla minima lavorazione del terreno eseguita entro 3-5 ore dallo spandimento superficiale.

### **3.3.2 ATTREZZATURE E SISTEMI PER LA DISTRIBUZIONE SUPERFICIALE**

Gli irrigatori e gli spandiliquame trainati con piatto deviatore sono sistemi classici, semplici e diffusi. Qui vengono citati solo per rammentare che sono caratterizzati da elevata pressione di esercizio e polverizzazione del getto (soprattutto gli irrigatori) con conseguenti elevate perdite di ammoniaca in aria e scarsa uniformità di distribuzione (soprattutto con il piatto deviatore). Si tratta di attrezzature molto versatili e poco costose, ma di cui si raccomanda la progressiva sostituzione (**Figura 20**) con attrezzature a minore impatto ambientale, soprattutto nel caso degli irrigatori ad alta pressione, poiché non consentono una corretta applicazione del digestato in un'ottica di fertilizzazione organica efficiente

Il ricorso alla **distribuzione superficiale rasoterra (Figura 21)**, effettuata con ali distributrici a bassa pressione, limita notevolmente gli impatti negativi per aerosol e odori. Tali sistemi possono essere installati su spandiliquame trainato o su tubazione avvolgibile e vengono utilizzati classicamente per la fertilizzazione di prati o in copertura dei cereali vernini. Meno diffuso, ma possibile, l'utilizzo per distribuzione superficiale subito prima della minima lavorazione del suolo. In tutti questi casi si opera a pressioni non superiori a 3-5 atmosfere all'ingresso della tubazione avvolgibile e a 1-2,5 atmosfere all'ala distributrice. I dispositivi hanno una larghezza complessiva variabile tra i 15 m e i 28 m e

garantiscono un'ampiezza utile di lavoro fino a 28-30 m.



**Figura 20** - Sistemi convenzionali di distribuzione superficiale di cui si raccomanda la sostituzione con sistemi a minor impatto.

La distribuzione avviene attraverso ugelli che possono essere dotati di piatto deviatore e dispositivo rompighetto oppure di tubazioni mobili che arrivano al livello del suolo. Quest'ultima soluzione, caratterizzata da un ridotto diametro degli ugelli, è particolarmente adatta per lo spandimento di digestato chiarificato.

### 3.3.3 FERTIRRIGAZIONE CON DIGESTATO



**Figura 21** - Sistemi di distribuzione superficiale rasoterra.

La fertirrigazione a bassa pressione mediante ali gocciolanti (manichette) è fra i più innovativi ed efficienti sistemi di distribuzione del digestato, messi a punto solo recentemente. Questa tecnica consente di frazionare e localizzare la fertilizzazione organica in funzione dei fabbisogni della pianta durante tutto il ciclo vegetativo. Inoltre, applicando, anche con il digestato, il concetto del "momento giusto, posto giusto e quantità giusta", consente un'elevata efficienza di utilizzo dell'acqua irrigua, sfruttando anche la frazione apportata con il digestato e riducendo al minimo i volumi e le perdite di acqua e le emissioni.

La fertirrigazione con ali gocciolanti richiede l'utilizzo di digestato liquido opportunamente chiarificato e ultrafiltrato così da garantire una ridotta presenza di solidi sospesi e piena funzionalità delle manichette. In fase di iniezione, il sistema può operare con una

diluizione digestato:acqua da 1:10 a 1:30 e, sulla base dei risultati ottenuti dal progetto Digestato100% del CRPA ([digestato100.crupa.it](http://digestato100.crupa.it)), è stato dimostrato come si possa sostituire completamente il concime chimico (**Figura 22**).

È una tecnica applicabile, in pieno campo, alle colture primaverili irrigue come mais e sorgo dove è stato dimostrato come garantisca rese paragonabili, se non superiori, alla classica fertirrigazione e un maggiore contenuto di proteine nel prodotto, a riprova dell'elevata efficienza di utilizzo dell'azoto da parte della pianta.



Anno del monitoraggio	Settore acqua + digestato		Settore urea e sola acqua	
	2017	2018	2017	2018
Ore di irrigazione	158	90	156	82
Turni irrigui	20	11	18	10
(di cui con digestato)	(13)	(11)	(-)	(-)
Acqua distribuita (mm)	279	152	274	157
Digestato iniettato (m <sup>3</sup> /ha)	52	49	0	0
Azoto nel digestato microfiltrato (kg/m <sup>3</sup> )	4,3	4,5	-	-
Azoto totale distribuito in fertirrigazione (kg/ha)	221	220	-	-
Azoto totale distribuito come urea (kg/ha)	0	0	276	250

Fonte: Mantovi P. et al. - Opuscolo risultati Progetto Digestato 100% - CRPA

**Figura 22** - Fertirrigazione con digestato microfiltrato su mais. Sopra l'attrezzatura di diluizione e iniezione in ala gocciolante in pieno campo. Sotto alcuni risultati produttivi e qualitativi su mais.

### 3.4 LA DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO PALABILE

Il digestato palabile è distribuito sul terreno mediante le stesse macchine impiegate per il letame, i cosiddetti carri spandiletame, caratterizzati da un sistema di traslazione del prodotto verso l'organo di distribuzione e un sistema apposito di distribuzione sul campo (**Figura 23**). Pur sapendo che per tale operazione i margini di ottimizzazione sono più contenuti rispetto a quanto è possibile attuare per la distribuzione in campo del digestato liquido, per ottimizzare l'operazione è comunque importante prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- **Capacità di trasporto:** consente di ridurre i tempi di lavoro, incrementare l'autonomia e, in caso di lunghe distanze da percorrere, ridurre sensibilmente il numero dei viaggi e, quindi, dei costi complessivi di distribuzione.
- **Capacità operativa di lavoro (ha/h):** è correlata alla dose da distribuire (t/ha), alla larghezza di distribuzione (m) e alla velocità di avanzamento mantenuta in campo (km/h): una maggiore larghezza di lavoro consente di incrementare la produttività del cantiere, con positivi effetti in termini di riduzione dei costi e del calpestamento per il minore numero di passaggi.
- **Controllo delle quantità e uniformità di distribuzione:** si tratta di due aspetti sempre più importanti anche per il materiale palabile, poiché quanto più è omogenea la distribuzione e tanto più sono controllate le quantità, tanto più si riduce l'impiego di concimi di sintesi e si aumenta l'efficienza della fertilizzazione organica. Per il controllo delle quantità, in particolare, si stanno affacciando sul mercato le prime soluzioni dotate di "celle di carico" in grado di misurare in continuo il peso residuo del prodotto e modulare il flusso in uscita in base a mappe di prescrizione.
- **Effetti sul suolo:** per limitare al massimo il compattamento del terreno, oltre a scegliere macchine dotate di elevata larghezza di lavoro e con un numero di assi proporzionato alla capacità di trasporto, anche per gli spandiletame è importante il ricorso a pneumatici a larga sezione e bassa pressione per aumentare l'area di contatto tra suolo e macchina, riducendo così la pressione a terra.



**Figura 23** - Esempi di attrezzature per la distribuzione del digestato palabile.

## 4. CONSIGLI DI CONCIMAZIONE CON DIGESTATO AGRICOLO

### 4.1 MAIS, SORGO

Mais e sorgo sono colture da rinnovo che hanno un'ottima capacità di sfruttamento della concimazione organica. Grazie all'elevata efficienza fisiologica (piante C4), queste colture realizzano le maggiori produzioni di sostanza secca per ettaro e le maggiori asportazioni azotate quando coltivate in condizioni ottimali.

Il ritmo di assorbimento dei principi nutritivi e, in particolare, dell'azoto si sovrappone abbastanza fedelmente all'andamento della mineralizzazione della sostanza organica del terreno e di quella apportata con il digestato. Per questo motivo, queste colture sono in grado di sfruttare al meglio il flusso di forme azotate che si rendono disponibili nel terreno (nitrati e ammonio) col procedere della stagione vegetativa.

- Il frazionamento della fertilizzazione con digestato consente di aumentare l'efficienza dell'azoto distribuito, ma, in ogni caso, è sconsigliabile l'eccessivo frazionamento e la distribuzione di dosi molto basse.
- La distribuzione in presemina è facilitata dalla buona portanza del terreno e assicura elevate efficienze d'uso del digestato poiché è eseguita durante la preparazione del letto di semina. L'apporto di digestato in questo frangente, inoltre, sostituisce anche la concimazione fosfatica, localizzata alla semina e necessaria all'emergenza della coltura.
- La distribuzione in copertura, un tempo improponibile, è oggi possibile grazie alle nuove attrezzature oggi disponibili (v. paragrafi 3.3.1 e 3.3.2); esse consentono non solo la distribuzione, ma anche la contemporanea sarchiatura e interramento, con un ulteriore miglioramento dell'efficienza grazie alla volatilizzazione ridotta.

#### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

Mais Irriguo: 280 kg N/ha			Mais non irriguo: 210 kg N/ha						Sorgo: 220 kg N/ha		
GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>MAIS / SORGO 1° RACCOLTO</b>											
DIGESTATO PRESEMINA		DIGESTATO IN SARCHIATURA			DIGESTATO IN FERTIRRIGAZIONE						
GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>CEREALE VERNINO</b>				<b>MAIS / SORGO 2° RACCOLTO</b>							
				DIGESTATO PRESEMINA		DIGESTATO IN SARCHIATURA		DIGESTATO IN FERTIRRIGAZIONE			
	Spandiliquame trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavorazione	Strip-Till	Sottosuperficiale solco aperto/Rasoterra					
<b>Presemina</b>	X	X	X	X	X						
<b>Sarchiatura</b>	X	X									

## 4.2 CEREALI AUTUNNO-VERNINI

La propensione all'uso di effluenti e digestati di questo gruppo di colture è tendenzialmente diversificata a seconda della fase colturale e a seconda delle condizioni di fertilità residua data dalle precessioni colturali. Alla semina dei cereali autunno-vernini (inizio autunno) può essere già presente un'adeguata scorta di nitrati provenienti dalla mineralizzazione della sostanza organica così come possono essere presenti quantità di residui colturali più o meno importanti. Entrambi questi fattori influenzano il soddisfacimento dei fabbisogni della pianta nelle fasi iniziali e, quindi, il quantitativo di nutrienti che sono effettivamente necessari. Considerato l'andamento climatico delle prime fasi del ciclo colturale, inoltre, va tenuto conto che la distribuzione di un quantitativo troppo elevato di elementi nutritivi in presemina potrebbe essere esposto a elevato rischio di lisciviazione.

La distribuzione di digestato effettuata alla ripresa vegetativa, in fase di accestimento/inizio levata, risulta più efficiente, poiché consente di garantire alla pianta i nutrienti disponibili nelle fasi più importanti del ciclo (da levata fino a riempimento seme). Tuttavia, è operativamente più complessa poiché richiede condizioni di umidità del terreno adeguate affinché si riduca al minimo il rischio di danneggiamento della copertura vegetale.

Su queste colture, data la più agevole operatività, la distribuzione di digestato può essere effettuata in autunno in presemina, sia con la frazione palabile che con una parte di frazione liquida così da garantire i nutrienti sia a pronto effetto (frazione liquida) per le prime fasi del ciclo che a più lento rilascio (frazione palabile). In caso di utilizzo di digestato tal quale o della frazione liquida, il ricorso a cantieri innovativi, quali quelli descritti nei paragrafi 3.3.1 e 3.3.2, consente di minimizzare gli svantaggi legati al periodo e operare con la migliore efficienza possibile.

### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

Frumento Tenero/Duro: 180 -190 kg N/ha			Triticale: 150 kg N/ha			Orzo: 150 kg N/ha								
SETT	OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	NOV	DIC			
<b>CEREALE VERNINO</b>														
DIGESTATO PRESEMINA												DIGESTATO IN COPERTURA		
	Spandiliqua- me trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavo- razione	Strip-Till	Sottosuper- ficiale solco aperto/ Rasoterra								
<b>Presemina</b>	X	X	X	X										
<b>Copertura</b>	X	X	X								X			

### 4.3 PRATI DI GRAMINACEE

Sono considerate fra le colture con la maggiore propensione alla concimazione con effluenti zootecnici e digestati, perché caratterizzate da elevate produzioni di sostanza secca (fino a 12 - 15 t/ha di sostanza secca negli anni di piena produzione) e, di conseguenza, da elevate asportazioni azotate (sino a 300 kg di azoto per ettaro).

Il cotico prativo, caratterizzato da una maggiore portanza, permette di distribuire il digestato anche in periodi relativamente umidi, limitando i rischi di compattamento del terreno. La disponibilità di sistemi innovativi per l'interramento consente l'interramento su cotico erboso massimizzando l'efficienza e minimizzando gli aspetti negativi.

La ripartizione in tagli della produzione annuale di foraggio permette di suddividere agevolmente la dose totale di azoto da apportare, massimizzandone l'efficienza. Questo maggior numero di momenti di distribuzione fa sì che i prati siano visti come le colture che meglio mettono d'accordo la produzione di digestato (continua, durante tutto l'anno) e la distribuzione (puntuale, nei momenti opportuni), fornendo maggiore elasticità al calendario di spandimento e alla gestione dei volumi di stoccaggio.

Nelle aree di pianura irrigua, il piano di concimazione tipico prevede la distribuzione del 50% del fabbisogno totale di azoto all'uscita dall'inverno, di un 25% dopo il primo e dopo il secondo taglio. Nei contesti non irrigui la concimazione è solitamente ripartita nelle prime due epoche.

In merito all'eventuale rischio per la salute degli animali dovuto all'imbrattamento dell'erba e, quindi, al veicolamento di microrganismi patogeni, si rammenta quanto segue:

- Il digestato presenta caratteristiche igienico-sanitarie migliori rispetto ai liquami tal quali e un adeguato periodo di maturazione in stoccaggio migliora ulteriormente la situazione (v. paragrafo 1.3)
- La distribuzione del digestato entro pochi giorni dallo sfalcio limita notevolmente lo sporcamento grazie alle minime dimensioni dei ricacci. Con la separazione solido/liquido si ottiene una frazione chiarificata che si infila nel suolo più velocemente e riduce ulteriormente il rischio di imbrattamento.

#### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

Prato permanente e avvicendato: 300 kg N/ha						Prato permanente e avvicendato con leguminose: 150 kg N/ha					
GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>PRATO PERMANENTE E AVVICENDATO</b>											
		50%		25%		25%					
		RIPRESA VEGETATIVA		DOPO 1° TAGLIO		DOPO 2° TAGLIO					
			Spandi- liquame trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavorazione	Strip-Till			Sottosuper- ficiale solco aperto/ Rasoterra	
<b>Ripresa vegetativa (50% della dose)</b>			X	X	X					X	
<b>Dopo 1° e 2° taglio (25% della dose cad.)</b>			X	X	X					X	



#### 4.4 ERBA MEDICA

Essendo una pianta azotofissatrice, risulta generalmente autosufficiente per quanto riguarda la nutrizione azotata. La distribuzione di una ridotta quantità di digestato pari a 30-40 kg/ha di N e relativo apporto di P, con funzione di starter, può rendersi necessaria quando ritarda la comparsa della nodulazione del rizobio<sup>6</sup>.

Per il carattere di soccorso di tale intervento è opportuno preferire la frazione liquida del digestato, data la maggiore presenza di azoto ammoniacale. Una volta insediato, invece, il medicaio non necessita di ulteriori somministrazioni se non ridotti apporti in fase di ripresa vegetativa primaverile sempre con funzione di starter e più che altro per ricostituire la dotazione di P in caso di bisogno; eventuali somministrazioni successive, infatti, porterebbero ad una inattivazione del rizobio.

#### Concimazione a fine ciclo produttivo (3-4 anni)

Nelle ultime fasi, il medicaio è assimilabile a una consociazione, più che a una coltura in purezza, per cui diventa giustificata la distribuzione di concime azotato allo scopo di spingere la produzione, favorendo le essenze non leguminose. Gli apporti effettuati alla ripresa vegetativa, dopo l'inverno, a vantaggio del primo sfalcio, nel quale predominano le graminacee, sono quelli che assicurano la maggiore efficienza dell'azoto distribuito.

La quantità da distribuire dipende dalla composizione botanica del prato e sarà tanto maggiore quanto maggiore è la percentuale di graminacee. In ogni caso, le concimazioni saranno contenute entro apporti massimi di 100 kg/ha di azoto per la somma dei due primi tagli.

#### PRATO DI MEDICA

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC
<b>MEDICAIO</b>												
	<div style="border: 1px solid blue; padding: 2px; display: inline-block;">RIPRESA VEGETATIVA</div>											
			Spandiliquame trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavorazione	Strip-Till	Sottosuperficiale solco aperto/Rasoterra				
<b>Impianto e mantenimento 30 - 40 kg N/ha</b>			X	X	X							X
<b>Fine ciclo fino a 100 kg N/ha</b>			X	X	X							X

#### 4.5 SOIA E ALTRE LEGUMINOSE DA GRANELLA

Così come la medica, anche la soia e le altre leguminose da granella sono azotofissatrici, pertanto essendo considerate pressoché autosufficienti per quanto riguarda la nutrizione azotata, necessitano solo di limitati apporti per lo più in pre-semina.

La funzione di una distribuzione di digestato, pari ad una quantità di azoto non superiore ai 30 kg/ha, può essere agronomicamente giustificata solo nei casi in cui sia necessario un effetto starter (terreni con poca fertilità residua) e come integrazione della necessaria fertilizzazione fosfatica di fondo soprattutto se localizzata in strip-till.

#### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

Soia e altre leguminose da granella: 30 kg N/ha

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
					<b>SOIA</b>								
				<div style="border: 1px solid blue; background-color: lightblue; padding: 5px; display: inline-block;">DIGESTATO PRESEMINA</div>									
				Spandiliquame trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavorazione	Strip-Till	Sottosuperficiale solco aperto/ Rasoterra				
<b>Presemina</b>			X	X	X	X	X	X					

#### 4.6 BARBABIETOLA DA ZUCCHERO

In linea generale, la fertilizzazione organica di questa coltura deve essere gestita in modo oculato poiché beneficia di apporti di fosforo e potassio all'impianto ma, allo stesso tempo, necessita di attenzione verso epoca di distribuzione e dosaggi di azoto soprattutto se si ricorre al digestato tal quale o chiarificato.

L'estraibilità del saccarosio dalle radici, infatti, risente negativamente della presenza di un'alta concentrazione di azoto nel terreno, soprattutto nelle fasi terminali del ciclo colturale, perché aumenta il tenore di azoto alfa-aminico nelle radici stesse.

Sulla coltura può essere consigliata la distribuzione di fondo con interrimento della frazione palabile del digestato: dalla sua mineralizzazione, infatti, si genera un flusso di azoto, più intenso col procedere della stagione, che contribuisce a soddisfare i fabbisogni crescenti della coltura. Per i motivi sopra citati occorre non eccedere con il dosaggio.

Lo schema di fertilizzazione, sia in semina primaverile che in semina autunnale, prevede un apporto interrato alla lavorazione del terreno, (ottimale se localizzato con strip-till) e un eventuale richiamo al momento della sarchiatura con macchine operatrici leggere in grado di lavorare tra le file.

#### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

Barbabetola da zucchero: 160 kg N/ha

	SETT	OTT	NOV	DIC	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO
<b>BARBABIETOLA DA ZUCCHERO (SEMINA AUTUNNALE)</b>												
	DIGESTATO PRESEMINA				DIGESTATO IN SARCHIATURA							
<b>BARBABIETOLA DA ZUCCHERO (SEMINA PRIMAVERILE)</b>												
	DIGESTATO PRESEMINA					DIGESTATO IN SARCHIATURA						
		Spandiliquame trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavorazione	Strip-till	Sottosuperficiale solco aperto/Rasoterra					
<b>Presemina</b>		X	X	X	X	X						
<b>Sarchiatura</b>		X	X									

#### 4.7 POMODORO DA INDUSTRIA

La tecnica di fertilizzazione e le quantità di nutrienti apportati influenzano direttamente la produzione e la qualità del pomodoro da industria. Gli elementi più importanti durante il ciclo colturale sono sicuramente azoto, fosforo e potassio, per la produzione e la qualità, ma anche calcio e magnesio per la sanità della bacca.

Per questi motivi, la fertilizzazione organica con digestato, se ben programmata, può garantire gli apporti corretti sia di macro che di micro-nutrienti. In particolare, sono due i momenti in cui si può intervenire con il digestato: la fase di pre-trapianto con frazione palabile e/o frazione liquida e durante il ciclo produttivo mediante fertirrigazione. In entrambi i casi è necessario controllare in maniera accurata le dosi al fine di evitare eccessi.

La gestione dell'azoto, in particolare, deve essere accurata poiché un eccesso al trapianto può inizialmente inibire la pianta e, nelle fasi successive, determinare un elevato rigoglio vegetativo, l'allungamento del ciclo e la maggiore scalarità di maturazione. Per questi motivi, soprattutto se si utilizza la frazione liquida, è necessario applicare un piano di concimazione accurato con una corretta distribuzione dei dosaggi così da seguire la coltura durante tutte le fasi del ciclo produttivo. In questo senso, oltre ad un intervento di fondo pre-trapianto, l'utilizzo in fertirrigazione potrebbe essere la strategia più indicata.

#### APPORTI MASSIMI STANDARD DI AZOTO (MAS) - All. X DM 5046/2016

##### Pomodoro da Industria: 180 kg N/ha

	GEN	FEB	MAR	APR	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	OTT	NOV	DIC	
	<b>POMODORO DA INDUSTRIA</b>												
		DIGESTATO PRE-TRAPIANTO				DIGESTATO IN FERTIRRIGAZIONE							
		Spandiliqua- me trainato	Semovente	Ombelicale	Minima lavo- razione	Strip-Till	Sottosuper- ficiale solco aperto/ Rasoterra						
<b>Pre-trapianto</b>		X	X	X	X	X							

#### 4.8 FRUTTETI E VIGNETI

Per le coltivazioni arboree, l'obiettivo primario della fertilizzazione non è solamente resa e qualità produttiva in conformità ai disciplinari di produzione delle produzioni tipiche, ma anche il mantenimento dell'equilibrio vegetativo e riproduttivo della pianta negli anni. Ne deriva che la fertilizzazione deve essere calibrata con molta attenzione sia in termini di dosaggio che per quanto riguarda le tempistiche di intervento affinché siano disponibili i corretti elementi nutritivi nei momenti opportuni. Le colture arboree, inoltre, si giovano particolarmente della fertilizzazione organica poiché consente un apporto di nutrienti complesso e a rilascio differenziato con particolare effetto sulla qualità del frutto.

I principali interventi nelle colture arboree sono di due tipi: la concimazione di fondo pre-impianto e la concimazione annuale di mantenimento.

##### Concimazione di fondo

Lo scopo è quello di restituire al terreno una dotazione di elementi nutritivi ottimale per supportare le prime fasi di impianto e predisporre un ambiente agronomico pronto a rispondere allo sviluppo della coltura. In questa fase, un apporto di frazione palabile del digestato risulta ottimale, in quanto apporta sostanza organica stabile a favore della struttura del terreno ed elementi a lento rilascio quali principalmente fosforo, potassio e azoto.

##### Concimazione annuale di mantenimento

La concimazione annuale di mantenimento, oltre ad essere programmata sulla base di quanto previsto dai disciplinari di produzione in tema di apporti organici, deve seguire alcuni criteri fondamentali. Nel caso dell'utilizzo di digestato, le distribuzioni più efficaci sono quella primaverile, alla ripresa vegetativa, e quella autunnale a fine produzione. La prima favorisce le prime fasi di risveglio vegetativo, mentre la seconda sostiene la lignificazione di fine ciclo in preparazione dell'inverno.

In entrambi i casi, va posta particolare attenzione agli apporti azotati tenuto conto che le asportazioni delle colture arboree sono comprese fra i 70 kg N/ha della vite fino ai 150-175 kg N/ha di actinidia e pesco. L'eccesso di azoto in fase primaverile, infatti, può penalizzare la produzione inducendo la pianta più verso la vegetazione che verso la differenziazione a frutto. Le distribuzioni di digestato, sia liquido che solido, vengono effettuate con macchine dedicate che consentono di intervenire rasoterra solo sulla fila a cui può seguire una incorporazione con una lavorazione interfilare intraceppi superficiale così da favorire anche il controllo delle malerbe senza danneggiare apparati radicali e il cotico erboso interfilare (**Figura 24**).



**Figura 24** - Esempi di attrezzature per la distribuzione del digestato in frutteto e vigneto.

## 5. LA CONCIMAZIONE DEL MAIS CON "DIGESTATO EQUIPARATO"

In questo capitolo, è riportato un esempio di concimazione del mais **impostato secondo i seguenti criteri**:

1. calendario delle distribuzioni del digestato, in dose unica o frazionata, nei momenti di maggiore efficienza dell'azoto compatibilmente con il ciclo colturale;
2. ricorso esclusivo a sistemi avanzati di distribuzione per operare nei periodi a maggiore efficienza d'uso dell'azoto;
3. indicazione della dose di digestato da distribuire per coprire in toto il fabbisogno di azoto della coltura, indipendentemente dalla quota di azoto di origine zootecnica eventualmente presente ipotizzando un coefficiente di efficienza pari all'80%.

In altre parole, lo scopo ultimo di questo esempio è quello di far comprendere i vantaggi derivanti da un uso agronomico davvero ottimizzato del digestato, indipendentemente dalla "natura" dell'azoto in esso presente (zootecnico o non) e stimolare l'effettiva adozione di tali soluzioni innovative, peraltro ampiamente disponibili sul mercato e spesso oggetto di incentivazione economica.

Questo approccio è lo stesso previsto dalla definizione di "digestato equiparato" prevista dall'art. 21 del D.L. 21 del 21 Marzo 2022 che ancora oggi non ha visto l'attuazione delle procedure applicative, necessarie affinché possa essere concretamente applicabile.

### 5.1 ESEMPIO DI FERTILIZZAZIONE DEL MAIS CON "DIGESTATO EQUIPARATO" IN AREA VULNERABILE AI NITRATI

Di seguito si riportano i prospetti con i dosaggi distribuibili nei due casi:

- prospetto A) Volume distribuibile in conformità con il Decreto 25.02.2016 e ipotizzando che l'azoto presente nel digestato sia in toto di origine zootecnica
- prospetto B) Volume distribuibile di "digestato equiparato"

**Prospetto A)** Dosaggio distribuibile di digestato zootecnico, ipotizzando l'uso di digestato liquido o chiarificato con una dotazione media di azoto pari a 3,96 kg/t (valore medio di cui alla **Tabella 3**) nel rispetto del limite di 170 kg/ha di azoto zootecnico in zona vulnerabile ai nitrati. La modesta quantità massima distribuibile rende di fatto improponibile il frazionamento della dose.

Nel caso in cui tutto l'azoto presente nel digestato sia di origine zootecnica, secondo il Decreto 25.02.2016 il volume massimo distribuibile per ettaro in zona vulnerabile ai nitrati è pari a 43 m<sup>3</sup>/ha.

Prospetto A	Fabbisogno NTK (kg/ha)	NTK (kg/ha)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)	Efficienza	NTK eff. (kg/ha)	NTK chimico (kg/ha)
Mais	280					
Digestato liquido	In presemina primaverile In copertura	170 --	43 --	0,65 --	111 --	
<b>TOTALE</b>		<b>170</b>	<b>43</b>		<b>111</b>	<b>169</b>

**Prospetto B)** Dosaggi distribuibili di “digestato equiparato”, ipotizzando l’uso di digestato liquido o chiarificato con una dotazione media di azoto pari a 3,96 kg/t (valore medio di cui alla **Tabella 3**).

Prospetto B	Fabbisogno NTK (kg/ha)	NTK (kg/ha)	Volume (m <sup>3</sup> /ha)	Efficienza	NTK eff. (kg/ha)	NTK chimico (kg/ha)
Mais	280					
Digestato liquido	In presemina	200	50	0,80	160	
	In copertura	150	38	0,80	120	
<b>TOTALE</b>		<b>350</b>	<b>88</b>		<b>280</b>	<b>0</b>

Dal confronto tra i due prospetti, ai fini degli effetti fertilizzanti, l’equiparazione del digestato agricolo con le previste caratteristiche e condizioni d’uso evidenzia le seguenti peculiarità:

- Il digestato equiparato consente di coprire completamente il fabbisogno azotato della coltura indipendentemente dall’origine zootecnica o meno dell’azoto contenuto, **con conseguente effettiva riduzione netta del ricorso a concimi di sintesi**. In proposito, si rammenta che ogni kg di azoto da urea non utilizzato equivale a una emissione evitata di quasi 5 kg di CO<sub>2</sub> eq (IPPC, 2017). In tal caso pertanto si evita la produzione di oltre 1 tonnellata di CO<sub>2</sub> eq per ettaro (5 kg CO<sub>2</sub> eq/kgN\*280 kgN/ha).
- Nelle zone vulnerabili ai nitrati, l’uso di digestato equiparato con azoto prevalentemente di origine zootecnica determina un superamento del vincolo di 170 kg/ha di azoto zootecnico. D’altra parte, poiché si deve effettuare una distribuzione altamente efficiente e si evita l’utilizzo di fertilizzanti di sintesi, si riducono al minimo le emissioni in atmosfera (ammoniaca e protossido di azoto da distribuzione del digestato) e si evitano quelle generate dalla produzione dei fertilizzanti di sintesi (CO<sub>2</sub>). In tal modo si ottiene un bilancio ambientale netto positivo.

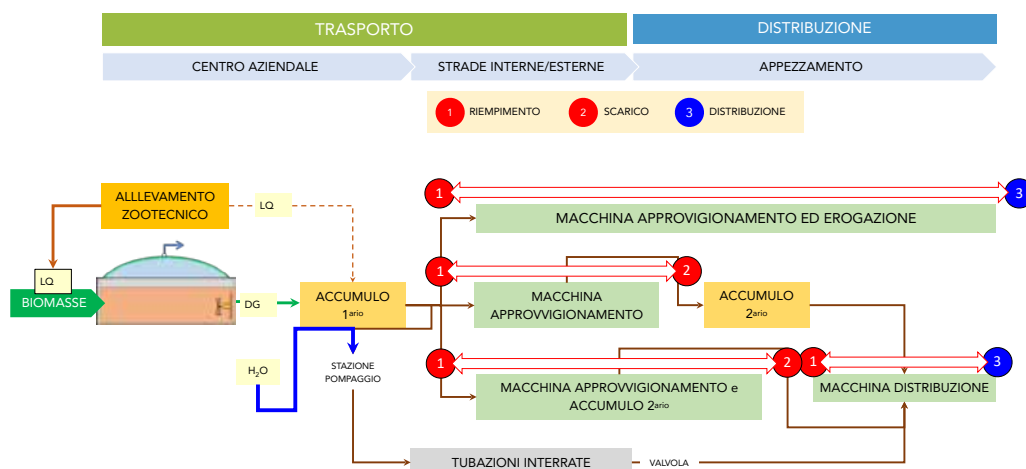
Ciò che preme infine evidenziare è quanto segue: date le condizioni richieste per l’equiparazione, ovvero l’impiego di sistemi innovativi di distribuzione (a bassa emissività e alta efficienza), l’opzione “digestato equiparato” di fatto spinge le aziende agricole ad adottare tecniche e pratiche agronomiche innovative e virtuose che favoriscono la riduzione delle emissioni di ammoniaca e di GHG del comparto agricolo nel suo complesso.

## 6. CARATTERISTICHE TECNICHE E COSTI DI DISTRIBUZIONE DEL DIGESTATO CON CANTIERI INNOVATIVI

Per poter attuare un'efficiente fertilizzazione organica con il digestato, non è solo sufficiente dotarsi delle attrezzature di distribuzione più all'avanguardia. Queste, infatti, necessitano del supporto di un vero e proprio cantiere di lavoro, che deve essere ottimizzato rispetto alle specificità aziendali, al fine di ottenere produttività di lavoro, efficienza e necessaria tempestività di intervento a seconda del periodo e delle esigenze colturali. La strutturazione di un moderno ed efficiente cantiere di meccanizzazione per la distribuzione del digestato, quindi, deve partire dall'analisi delle caratteristiche delle macchine che lo compongono (**Figura 25**):

- **fase di trasporto:** che parte dallo stoccaggio del digestato in impianto (accumulo 1° ario), passa per il conferimento all'appezzamento da fertilizzare e si conclude con l'alimentazione della macchina operatrice.
- **fase di distribuzione in campo:** che parte con il carico della macchina operatrice di distribuzione e la successiva erogazione della dose prestabilita, direttamente interrata con minima lavorazione oppure in copertura su coltura in atto mediante idonei applicatori.

Entrambe le fasi possono essere attuate con modalità e macchine diversificate, in relazione a numerosi fattori (tipo e consistenza del parco macchine aziendale, possibilità/opportunità di ricorrere a imprese di servizi agro-meccanici, distanza azienda-appezzamenti, tempi utili a disposizione, colture e piani colturali, ecc.). Inoltre, al pari di ogni altra operazione meccanica, anche i cantieri per la fertilizzazione organica con digestato, devono essere studiati con l'obiettivo di ottenere il miglior compromesso tra minimizzazione dei costi (tipicamente espressi in €/m<sup>3</sup> o €/ha) e tempi di lavoro (h/ha), ovvero la massimizzazione della tempestività di intervento. Inoltre, con l'opportuna configurazione dei cantieri innovativi, oltre al miglior compromesso economico, si raggiunge anche la migliore prestazione ambientale a tutto vantaggio della produttività della coltura.



**Figura 25** - Schema generale delle possibili soluzioni adottabili per l'impiego agronomico del digestato (a cura di M. Fiala, UniMi)



## 6.1 FASE DI TRASPORTO

La scelta delle attrezzature per il trasporto del digestato e il loro dimensionamento è direttamente correlata alla capacità di lavoro operativa (ha/h) della macchina operatrice sul campo, alla dose da distribuire e alla conformazione aziendale. Il presupposto che rende razionali, efficienti ed economici i cantieri di meccanizzazione di questo tipo, infatti, è che la macchina operante sull'appezzamento disponga delle condizioni ottimali per:

- raggiungere elevate capacità di lavoro effettivo;
- ridurre al minimo i tempi accessori;
- azzerare i tempi morti.

Ne deriva che, nella strutturazione del cantiere, la coerenza fra trasporto e distribuzione è presupposto essenziale nel determinare buona operatività e ridotti costi complessivi. Nel caso di aziende accorpate e contenute distanze fra accumulo 1ario e campo, il trasporto potrebbe essere realizzato con una rete di tubazioni interrata e valvole di erogazione distribuite alle testate di ciascun appezzamento. Questa soluzione, che prevede in testa un'apposita stazione di pompaggio, è tecnicamente molto semplice ed efficace, ma richiede un investimento strutturale aziendale importante. In questo caso, è fondamentale che la stazione di pompaggio garantisca la portata necessaria ( $t/h$  o  $m^3/h$ ) affinché il sistema di distribuzione ombelicale possa operare in continuo, alla dose programmata ( $t/h$  o  $m^3/h$ ) e in maniera uniforme.

Diversamente, nel caso in cui non vi siano le condizioni per un sistema di tubazioni interrate o nel caso di aziende non accorpate e medio-lunghe distanze fra accumulo 1ario e campo, sarà necessario un sistema di trasporto (con carbotte trainate o autotreno cisterna) e un eventuale accumulo 2ario a bordo campo (il cosiddetto carro "balia"). In questo caso il numero di mezzi di trasporto e il loro dimensionamento dovrà garantire che il digestato arrivi alla macchina di distribuzione con un flusso congruente alle sue modalità operative e alla dose prefissata.

Grazie all'evoluzione e al dinamismo che ha contraddistinto il settore della fertilizzazione organica negli ultimi anni, è possibile disporre di diverse soluzioni dotate di elevata autonomia (volumi del serbatoio  $V = 15-32 m^3$ ), ed efficaci dispositivi di carico (bracci articolati, pompe di elevata portata,  $Q = 8000-10000 dm^3/min$ ). Entrambi questi aspetti costruttivi, insieme alle distanze e alla conformazione del percorso (sterrato, asfalto, ecc.), sono i fattori che influenzano direttamente i tempi di trasferimento, carico e scarico e, quindi, l'ottimizzazione del numero dei mezzi da utilizzare.

Sia nel caso si adottino accumuli 2ari a bordo campo, sia nel caso l'operatrice si approvvigioni direttamente, per fare la spola tra accumulo 1ario e appezzamento, vengono utilizzati generalmente carri botte di grande capacità ( $V = 25-30 m^3$ ) trainati da trattore oppure, laddove l'accesso ai fondi lo permetta, autocisterne dotate di motrice stradale ( $V = 32-35 m^3$ ), oggi in significativa diffusione (**Figura 26**).



**Figura 26** - A sinistra, carro botte a grande volumetria per trasporto digestato; a destra, autocisterna dotata di motrice stradale e al centro esempio di accumulo 2ario "carro balia" da porre a bordo campo.

## 6.2 FASE DI DISTRIBUZIONE IN CAMPO

Le macchine impiegate in questa seconda fase, devono garantire la distribuzione uniforme della dose prestabilita, la migliore capacità produttiva e la minore compattazione del terreno. Sono tutti aspetti che sostanzialmente dipendono dalle caratteristiche costruttive delle macchine impiegate (serbatoi, pompe, ripartitori, sistemi di distribuzione, dispositivi di controllo, ecc.), dalle condizioni operative (velocità avanzamento, abilità conducente, forma e pendenza dell'appezzamento, ecc.) e, soprattutto, dal corretto dimensionamento del cantiere. Sono, dunque, variabili da intervento a intervento.

Determinata la dose di distribuzione ( $t/ha$ ;  $m^3/ha$ ), in base al titolo di N Totale (NTK) del digestato, del fabbisogno della pianta e dell'eventuale conoscenza della fertilità del suolo, la macchina di distribuzione deve garantire la corretta portata di erogazione ( $Q_D$  -  $kg/min$ ) e uniforme su tutta la superficie coltivata. Tale portata è in funzione della velocità di avanzamento ( $v_a$  -  $km/h$ ) e della larghezza utile di lavoro ( $b_u$  -  $m$ ) ed è un elemento fondamentale nella strutturazione del cantiere visto che, da un lato, determina il tempo di svuotamento del serbatoio ( $t_{sv}$  -  $min$ ) e, dunque, l'autonomia di distribuzione; dall'altro lato, condiziona il dimensionamento del cantiere di trasporto a monte.

Immaginando di voler distribuire ad alta efficienza ( $k=0,8$ ) il digestato liquido con NTK =  $3,96$   $g/kg$ , così come caratterizzato nel capitolo precedente, per soddisfare completamente il fabbisogno di mais irriguo la cui asportazione azotata (MAS) è  $280$   $kg/ha$ , la dose da distribuire ( $D$ ;  $t/ha$ ) risulta essere:

$$D = (MAS/k) / NTK = (280/0,8) / 0,00396 = 88.384 \text{ kg/ha pari a } 88 \text{ t/ha}$$

Disponendo, ad esempio, di un carro spandiliquame a tre assi trainato con serbatoio di volume  $V = 22,0$   $m^3$ , che opera a velocità  $v_a = 7$   $km/h$ , interrando il digestato con un coltivatore posteriore a dischiera di larghezza  $b_u = 5$   $m$ , la portata di distribuzione ( $Q_D$  -  $kg/min$ ) necessaria per garantire la dose ( $D$ ) di cui sopra sarà calcolata come segue:

$$Q_D = (D \times b_u \times v_a) / 600 = (88.384 \times 5 \times 7) / 600 = 5.156 \text{ kg/min}$$

Ne consegue che il tempo di svuotamento del serbatoio ( $t_{sv}$ ;  $min$ ), considerata una densità del digestato ( $r$  -  $kg/m^3$ ) pari a  $1015$   $kg/m^3$ , risulta:

$$t_{sv} = (V \times r) / Q_D = (22,0 \times 1015) / 5.156 = 4,33 \text{ min} = 4'20''$$

Il tempo di svuotamento (lavoro effettivo), sommato ai tempi di manovra in campo e ai tempi necessari per il raggiungimento dell'accumulo, concorrono a determinare il tempo totale della fase di distribuzione. In tale tempo deve essere garantito il rifornimento dall'accumulo, così da evitare tempi morti della macchina operatrice, con aggravio dei costi.

Tutte le macchine più avanzate per la distribuzione sono dotate di sistemi di controllo della guida (RTK) e della portata facenti capo alla cabina dell'operatore. I più semplici, alle variazioni di velocità o di larghezza di lavoro, per mantenere costante la dose, fanno corrispondere la proporzionale variazione della portata di distribuzione mediante una parzializzazione degli efflussi della pompa volumetrica.

Nel caso di macchine basate sulla tecnologia a rateo variabile (VRT), la portata di distribuzione varia, oltre che per le cause già citate, anche in funzione di informazioni precedentemente raccolte e opportunamente elaborate. Sulla base di mappe della fertilità del suolo e mappe multispettrali dello stato di vigore della pianta (NDVI, NDRE<sup>2</sup>), è possibile identificare le zone dell'appezzamento più bisognose di apporti azotati e, in base alle caratteristiche del digestato (da analisi media dello stoccaggio o da analisi in continuo NIRs a bordo della stessa macchina), elaborare mappe di prescrizione con le quali differenziare la dose distribuita per aree omogenee in base alle esigenze della coltura (**Figura 27**).



Fonte: <https://www.dronebee.it/servizi/mappe-di-prescrizione/>

**Figura 27** - Mappa multispettrale NDVI (sinistra) e mappa di prescrizione (destra).

La potenzialità di tali sistemi è stata studiata nel progetto Biogas4.0 ([www.biogas4zero.it](http://www.biogas4zero.it)) grazie al quale è stato possibile dimostrare che già l'applicazione di un rateo variabile "semplificato" su aree omogenee e basato sull'analisi media del digestato, è sufficiente per ottenere risultati positivi sia in termini di ottimizzazione della quantità distribuita che nella risposta produttiva della pianta, paragonabile se non superiore a quella ottenuta con sistemi tradizionali.

Le macchine operatrici che rispondono ai requisiti sopra esposti e che normalmente vengono utilizzate per la fase di erogazione e lavorazione del suolo sono generalmente di due tipi: spandiliquame trainati di nuova generazione dotati di 1 o più assi, serbatoio di differenti volumi e ruote larghe a bassa pressione; spandiliquame semoventi a 3 o più assi con serbatoio di differenti volumi, ruote larghe con controllo della pressione, possibilità di cambio della carreggiata durante la fase di lavoro per una migliore distribuzione dei pesi. In entrambi i casi, inoltre, l'interramento del digestato avviene mediante l'accoppiamento posteriore con coltivatori per minima lavorazione (ancore molli o dischiere), strip-till o con attrezzi per interventi su prati e/o in copertura.

### 6.3 LA CAPACITÀ OPERATIVA E LA CONFIGURAZIONE DEL CANTIERE

L'ottimizzazione delle fasi che compongono il cantiere di utilizzazione del digestato concorre ad aumentare la sua capacità operativa (ha/h), ovvero la superficie lavorata rispetto al tempo impiegato per completare l'operazione. Il presupposto che rende razionali, efficienti ed economici i cantieri avanzati per la fertilizzazione organica è quello di ottenere la migliore capacità di lavoro, riducendo i tempi accessori e azzerando i tempi morti.

Per poter fare una corretta configurazione di un cantiere, si devono valutare le prestazioni delle singole macchine che lo compongono e la suddivisione delle operazioni da attuare.

Il criterio basilare è quello secondo il quale la produttività operativa della macchina per la distribuzione in campo (tonnellate di digestato/h), debba essere raggiunta da tutte le macchine che la precedono. In questo modo si garantisce sia che al campo giunga il flusso di digestato necessario per soddisfare le necessità della coltura, sia l'esecuzione dell'operazione in un tempo totale definito ( $t_{tot} - h$ ).

Più in dettaglio, il tempo totale delle operazioni è dato dalla somma dei tempi delle diverse fasi di lavoro, ognuna delle quali è influenzata da diversi fattori:

OPERAZIONE	DESCRIZIONE	FATTORI DI INFLUENZA
RIEMPIMENTO TRASPORTO	Da accumulo 1 <sup>ario</sup> a serbatoio di trasporto	$t_{R1}$ (s) è in funzione di: volume del serbatoio ( $m^3$ ); portata pompa riempimento ( $dm^3/min$ ), tempi accessori di manovra e predisposizione al carico
TRASFERIMENTO	Da accumulo 1 <sup>ario</sup> a campo	$t_T$ (s) è funzione di: distanza (km), velocità media di trasferimento a vuoto e a pieno carico (km/h), a seconda del tipo di percorso e fondo stradale (stoppie, sterrato, asfalto)
SCARICO	Da serbatoio di trasporto ad accumulo 2 <sup>ario</sup>	$t_S$ (s) è funzione di: volume serbatoio ( $m^3$ ), portata pompa scarico ( $dm^3/min$ ), eventuali tempi accessori di manovra e predisposizione allo scarico
RIEMPIMENTO OPERATRICE	Da accumulo 2 <sup>ario</sup> a serbatoio macchina operatrice	$t_{R2}$ (s) è funzione di: volume serbatoio ( $m^3$ ), portata pompa riempimento ( $dm^3/min$ ), eventuali tempi accessori di manovra e predisposizione al carico
DISTRIBUZIONE	Da serbatoio macchina operatrice a campo	$t_D$ (s) è funzione di: portata di distribuzione (t/h), proporzionale a dose (t/ha), larghezza di lavoro utile (m), velocità avanzamento in campo a pieno e ritorno a vuoto verso l'approvvigionamento (km/h) e tempi accessori (es.: svolte)
TEMPO TOTALE	Da accumulo 1 <sup>ario</sup> a distribuzione in campo	$t_{tot} (s) = t_{R1} + t_T + t_S + t_{R2} + t_D$

Sulla base di queste valutazioni, potrà essere configurato il cantiere più idoneo alle caratteristiche strutturali dell'azienda e potranno essere definiti sia il numero ottimale dei mezzi che lo compongono, sia i relativi costi di esercizio.

### 6.4 I COSTI DI ESERCIZIO DEI CANTIERI INNOVATIVI

Per poter valutare i costi di esercizio dei più diffusi cantieri innovativi, è stato realizzato un modello di simulazione che, basandosi sulle assunzioni dei capitoli precedenti, consenta la completa descrizione operativa e la valutazione tecnico-economica di soluzioni meccanizzate ottimizzate in base alla distanza tra l'accumulo 1ario e l'appezzamento.

Per la simulazione si riporta l'esempio di un'azienda agro-zootecnica tipica della Pianura Padana, dotata di impianto biogas, con buona accessibilità e regolare configurazione dei campi. I fattori di base di cui si è tenuto conto sono:

- Coltivazione di mais irriguo la cui asportazione (MAS) è pari a 280 kg N/ha
- Utilizzo di digestato liquido con concentrazione di N totale (NTK) pari a 3,96 kg/t
- Coefficiente di efficienza di distribuzione  $k = 0,8$  (situazione di equiparazione ai concimi chimici)
- Dose di distribuzione da garantire:  $D = (MAS/k) / NTK = (280/0,8) / 3,96 = 88,4$  t/ha di digestato
- All'aumentare della distanza dall'accumulo 1ario al campo, si è considerato un progressivo aumento della percorrenza su strade asfaltate rispetto agli spostamenti su sterrato e stoppie.

Per gli aspetti economici, si sono prese a riferimento le tariffe ufficiali per l'anno 2023 dei servizi agro-meccanici delle province di Lodi e Cremona (APIMA Lodi e APIMA Cremona), considerando che, per l'applicazione dei cantieri più innovativi, l'azienda faccia ricorso completamente al servizio contoterzi.

Nella simulazione, infine, sono state comparate diverse configurazioni tenuto conto che per tutte il punto di partenza è l'accumulo 1ario del digestato nel centro aziendale e che la distanza da questo ai campi varii da 1, 3, 5, 10 fino ad un massimo di 20 km

(**Tabella 9**).

**Tabella 9** - Organizzazione dei cantieri di meccanizzazione avanzati messi a confronto nella simulazione.

CANTIERE	TRASPORTO		DISTRIBUZIONE	
	CARICO E TRASFERIMENTO	ACCUMULO 2 <sup>ario</sup> (Campo)	MACCHINA OPERATRICE	TIPO DI LAVORAZIONE
A1 - Carro spandilquame trainato per trasporto e distribuzione				Minima lavorazione
B1 - Carrobotte + balia + spandilquame trainato				Minima Lavorazione / Strip-till
B2 - Autocisterna + balia + spandilquame trainato				Minima lavorazione / Strip-till
C1 - Carrobotte + balia + spandilquame semovente				Dissodatura / Minima lavorazione
C2 - Autocisterna + balia + spandilquame semovente				
D - Tubatura interrata fino a 3 km + rotolone + interruttore ombelicale				

### 6.4.1 CANTIERE A1: CARRO SPANDILQUAME TRAINATO PER TRASPORTO E DISTRIBUZIONE

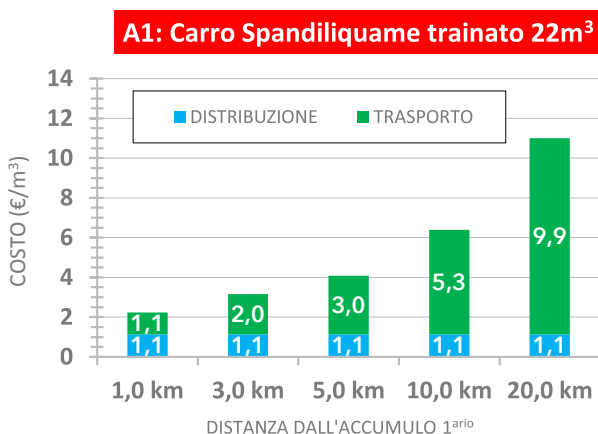
È il cantiere in assoluto più semplice in cui i carri spandilquame, il cui numero varia in funzione delle distanze da percorrere e delle velocità medie tenute nel tragitto, sono equipaggiati con dispositivi diversi in funzione della tipologia di distribuzione da eseguire. I carri fanno la spola tra l'accumulo 1ario e l'appezzamento, svolgendo sia le operazioni di trasporto che di distribuzione.

CENTRO AZIENDALE ACCUMULO 1 <sup>ario</sup>	TRASPORTO		DISTRIBUZIONE	
	Strade interne/esterne		Appezzamento	
	CARICO E TRASFERIMENTO	ACCUMULO 2 <sup>ario</sup> (Campo)	MACCHINA OPERATRICE	TIPO DI LAVORAZIONE
				Minima lavorazione

I parametri utilizzati ai fini della modellizzazione del cantiere

MACCHINA	FASI	PARAMETRI DI CALCOLO
	Trasporto: SI Distribuzione: SI	Assi: na = 3. Volume serbatoio: V = 22 m <sup>3</sup> Velocità media trasf.: 15-25 km/h (andata, carro carico); 19-30 km/h (ritorno, carro vuoto) Velocità lavoro (distribuzione): 5km/h Dose: 88,4 t/ha. Larghezza di lavoro in minima lavorazione: 5,0 m Tariffa contoterzista: 140 €/h

#### Costi operativi








È una soluzione tutt'ora molto diffusa e utilizzata che, ai fini della simulazione, ha pertanto la funzione di cantiere di riferimento. Ha il vantaggio di poter impiegare sia le macchine del parco aziendale che macchine di imprese (contoterzisti) e di avere costi di esercizio contenuti (3-4 €/m<sup>3</sup> per distanze medie di 3-5 km) in cui il costo di trasporto presenta già la maggiore incidenza. Ha lo svantaggio di avere una ca-





pacità di lavoro ridotta che si riduce via via che la distanza dall'appezzamento aumenta. Infatti, se con appezzamenti distanti 1 km può avere una produttività giornaliera (10 ore lavorative) fino a 7 ha e 637 t di digestato distribuito al giorno, con appezzamenti a 20 km la produttività si riduce a 1,5 ha e 130 t di digestato distribuito al giorno.

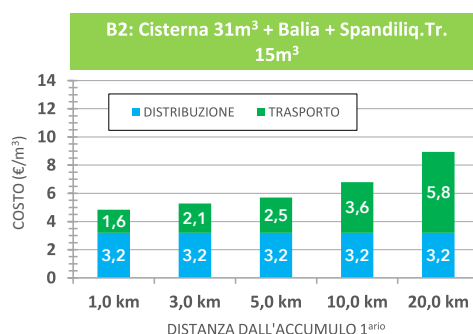
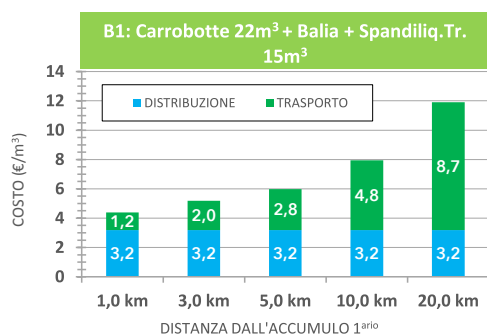
### 6.4.2 CANTIERI B1 E B2: DISTRIBUZIONE CON CARRO SPANDILIQUEAME TRAINATO

Come riportato nei capitoli precedenti, l'efficientamento dei cantieri si ottiene assicurando alla macchina operatrice in campo il rifornimento di prodotto al fine di minimizzare tempi morti e accessori. I cantieri B1 e B2 sono caratterizzati da una fase di distribuzione effettuata con carro spandiliqueame trainato di ultima generazione, da un eventuale accumulo 2ario in campo (carro balia) e da una organizzazione del trasporto del digestato dall'accumulo 1ario basata sull'impiego di carri botte trainati da trattrice (B1) oppure da autocisterne (B2).

CENTRO AZIENDALE ACCUMULO 1 <sup>ario</sup>	TRASPORTO		DISTRIBUZIONE	
	Strade interne/esterne		Appezzamento	
	CARICO E TRASFERIMENTO	ACCUMULO 2 <sup>ario</sup> (Campo)	MACCHINA OPERATRICE	TIPO DI LAVORAZIONE
	 			Minima Lavorazione / Strip-till

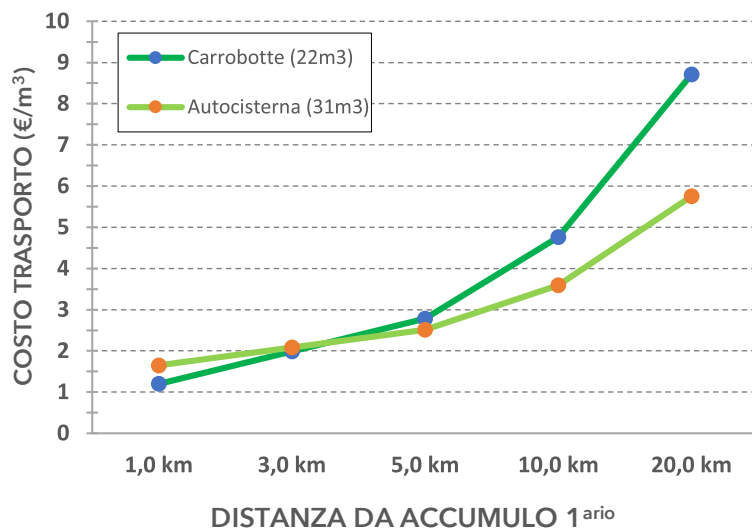
#### I parametri utilizzati ai fini della modellizzazione del cantiere

MACCHINA	FASI	PARAMETRI DI CALCOLO
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Assi: na = 3. Volume serbatoio: $V = 22 \text{ m}^3$ Portata di carico $10.000 \text{ dm}^3/\text{min}$ Velocità media trasf.: 15-25 km/h (andata, carro carico); 19-30 km/h (ritorno, carro vuoto) Costo operativo 120 €/h
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Volume serbatoio: $V = 31 \text{ m}^3$ . Portata di carico $5.000 \text{ dm}^3/\text{min}$ Velocità media trasf.: 25-40 km/h (andata carro carico e ritorno vuoto) Costo operativo 135 €/h
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Volume serbatoio $V = 70 \text{ m}^3$
	Trasporto: NO Distribuzione: SI	Assi: na = 1. Volume serbatoio: $V = 15 \text{ m}^3$ Velocità lavoro (distribuzione): 5 km/h Dose: 88,4 t/ha. Larghezza di lavoro in minima lavorazione: 5,0 m Tariffa contoterzista $2,5 \text{ €/m}^3 + 60\text{€/ha}$ per la minima lavorazione



### Costi operativi

Come si può notare dal confronto dei costi operativi si conferma come, anche in questo caso, incida significativamente il costo di trasporto. Tuttavia, a distanze ridotte (1-3 km), la soluzione utilizzata (carro botte o autocisterna) è pressoché indifferente rispetto al costo. Oltre i 3 km, invece, la scelta di attrezzature con maggiori volumi e velocità di trasferimento (cantiere B2 - autocisterna) consente una significativa ottimizzazione dei costi del



**Figura 28** - Confronto tra i costi di trasporto di carro botte (22m<sup>3</sup>) e autocisterna (31m<sup>3</sup>) in funzione della distanza percorsa

trasporto oltre che del numero di mezzi coinvolti (**Figura 28**).


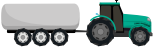



Per quanto riguarda la fase di distribuzione, rispetto al cantiere precedente, con questa configurazione si ha il vantaggio di un incremento della capacità operativa potendo dedicare la macchina operatrice in maniera continua alla sola fase di campo. In particolare, con una buona strutturazione logistica questo cantiere può raggiungere una produttività giornaliera (10 ore lavorate) di 10 ha con 888 t di digestato distribuito, indipendentemente dalla distanza.

Più in generale, a fronte di una migliore produttività, i costi operativi medi di questi cantieri con distanze di 3-5 km si attestano mediamente su 5-5,5 €/m<sup>3</sup> in ragione della maggiore specializzazione del lavoro.







### 6.4.3 CANTIERI C1 E C2: DISTRIBUZIONE CON SPANDILIQUEME SEMOVENTE

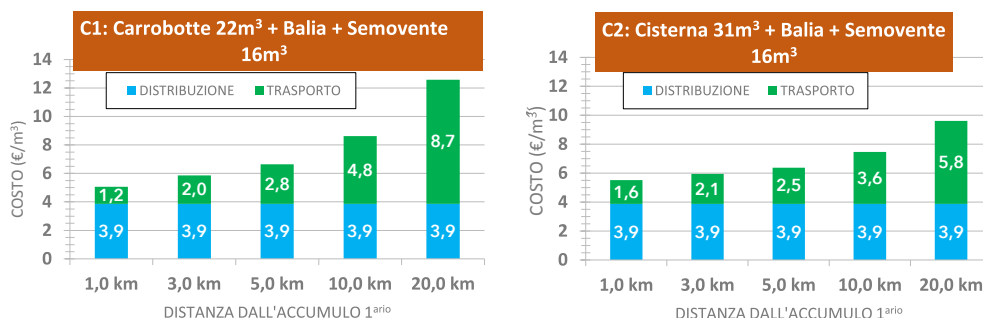
I cantieri C1 e C2 sono strutturati in maniera analoga ai cantieri B1 e B2 per quanto riguarda il trasporto, ma sono caratterizzati da una fase di distribuzione effettuata con carro spandiliqueame semovente. Come visto precedentemente, per la logistica di trasporto del prodotto dall'accumulo 1ario vengono utilizzati carri botte trainati da trattore (C1) oppure autocisterne (C2).

CENTRO AZIENDALE ACCUMULO 1 <sup>ario</sup>	TRASPORTO		DISTRIBUZIONE	
	Strade interne/esterne		Apezzamento	
	CARICO E TRASFERIMENTO	ACCUMULO 2 <sup>ario</sup> (Campo)	MACCHINA OPERATRICE	TIPO DI LAVORAZIONE
	 			Minima Lavorazione / Strip-till

I parametri utilizzati ai fini della modellizzazione del cantiere

MACCHINA	FASI	PARAMETRI DI CALCOLO
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Assi: na = 3. Volume serbatoio: $V = 22 \text{ m}^3$ Portata di carico $10.000 \text{ dm}^3/\text{min}$ Velocità media di trasf.: 15-25 km/h (andata, carro carico); 19-30 km/h (ritorno, carro vuoto) Tariffa contoterzista: 120 €/h
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Volume serbatoio: $V = 31 \text{ m}^3$ Portata di carico $5.000 \text{ dm}^3/\text{min}$ Velocità media di trasf.: 25-40 km/h (andata, carro carico e ritorno vuoto); Tariffa contoterzista: 135 €/h
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Volume serbatoio $V = 70 \text{ m}^3$
	Trasporto: NO Distribuzione: SI	Assi: na = 2 o 3. Volume serbatoio: $V = 16 \text{ m}^3$ Velocità lavoro (distribuzione): 7 km/h Dose: $88,4 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Larghezza di lavoro in minima lavorazione: 5 m Tariffa contoterzista: $3 \text{ €/m}^3 + 75-90 \text{ €/ha}$ per la minima lavorazione/strip-till

### Costi operativi



Come si può notare dal confronto dei costi operativi, si confermano le valutazioni fatte precedentemente per la fase di trasporto. Nel caso specifico, affinché il cantiere sia ottimizzato è necessaria un'elevata efficienza e capacità operativa dei trasporti, analoghe a quelle della macchina operatrice in campo.

Per quanto riguarda la fase di distribuzione, invece, con questa configurazione si ha il vantaggio di lavorare con una macchina altamente specializzata riducendo ulteriormente, rispetto allo spandiliquame trainato, i tempi accessori (minore tempo per le svolte, maggiore velocità di applicazione). Tutto questo si traduce in una produttività giornaliera (10 ore lavorate) che può raggiungere i 14,4 ha con 1274 t di digestato distribuito, indipendentemente dalla distanza.



Il rovescio della medaglia è che, a fronte di interventi sempre più efficienti, macchine così particolari richiedono investimenti rilevanti che si traducono in tariffe più elevate e, quindi, in un costo operativo complessivo leggermente più alto dei precedenti: 5,5-6 €/m³ a 3-5 km di distanza dal centro aziendale.

#### 6.4.4 CANTIERE D: DISTRIBUZIONE CON COLTIVATORE OMBELICALE

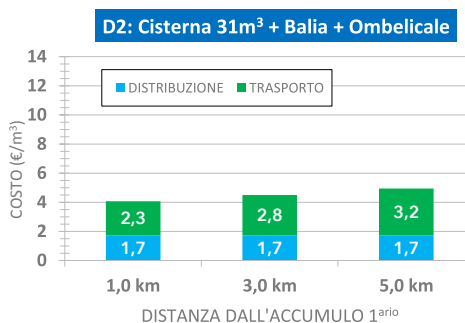
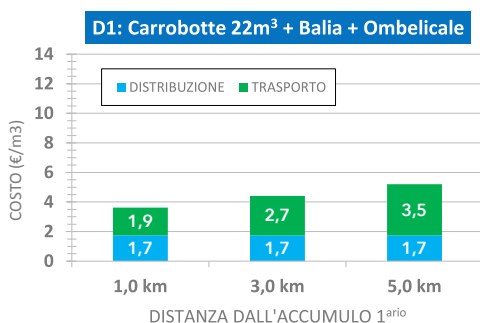
Il cantiere con coltivatore ombelicale pur essendo ad alta specializzazione, richiede l'impiego di un numero ridotto di macchine operatrici che, però, devono essere alimentate con un sistema di pompaggio e tubatura interrata asservito a tutta l'azienda. Essendo quindi indicato per situazioni accorpate, la sua applicazione è stata simulata per distanze fino ai 5 km. Inoltre, al pari degli altri cantieri, richiederebbe comunque l'utilizzo di sistemi di trasporto con carri botte o autocisterne e un accumulo 2ario a bordo campo (carro balia) con ulteriori tempi accessori per l'installazione delle tubature flessibili a servizio dell'irrigatore.

CENTRO AZIENDALE ACCUMULO 1 <sup>ario</sup>	TRASPORTO		DISTRIBUZIONE	
	Strade interne/esterne		Appezzamento	
	CARICO E TRASFERIMENTO	ACCUMULO 2ario (Campo)	MACCHINA OPERATRICE	TIPO DI LAVORAZIONE
				Dissodatura / Minima lavorazione

### I parametri utilizzati ai fini della modellizzazione del cantiere

MACCHINA	FASI	PARAMETRI DI CALCOLO
	Trasporto: SI Distribuzione: NO	Lunghezza della bobina commisurata alla lunghezza dei campi Portata operativa equivalente a quella necessaria al coltivatore ombelicale Tariffa contoterzista: 0,69 €/m <sup>3</sup> (pari a 100€/h per un irrigatore a rotolo)
	Trasporto: NO Distribuzione: SI	Velocità lavoro (distribuzione): 4km/h Dose: 88,4 m <sup>3</sup> /ha. Larghezza di lavoro: 4 m Portata operativa: 147,3 t/h Tariffa contoterzista: 1,7 €/m <sup>3</sup> (equivalente a 150 €/ha per una erpicatura con coltivatore)

### Costi Operativi



Come detto, il cantiere con ombelicale ha il vantaggio di avere, per la fase di trasporto, una rete interrata fissa i cui costi di esercizio sono determinati dal funzionamento della stazione di pompaggio e degli eventuali richiami presenti nel sistema. Per questo, la fase di distribuzione, richiede l'impegno di un numero limitato di macchine (irrigatore a rotolo con tubo flessibile e trattore con coltivatore) e con una ridotta dislocazione di massa (non vi è alcun serbatoio che percorre l'appezzamento). Per contro, questo cantiere può risultare di più complessa applicazione nel caso in cui gli appezzamenti non risultino regolari e richiede tempi accessori per lo svolgimento e la messa in opera dei tubi flessibili e la preparazione del cantiere.

Ai fini del calcolo dei costi operativi, tenuto conto della complessità di valutazione dei costi operativi della tubatura interrata, poiché sito-specifici, sono stati applicati i costi di trasporto applicando i sistemi già visti precedentemente. In questo modo è stato possibile un confronto più diretto con gli altri cantieri pur considerando una distanza massima di trasporto di 5 km in considerazione del fatto che una eventuale tubazione interrata sicuramente non avrebbe sviluppo maggiore.

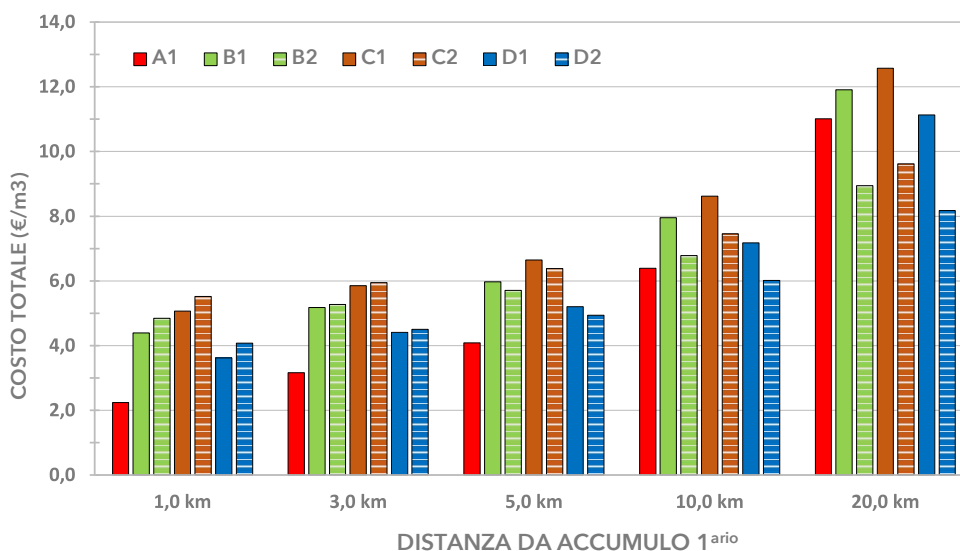
Potendo lavorare in continuo senza bisogno di fermate per il carico, può raggiungere una produttività giornaliera (10 ore lavorate) di circa 16 ha con 1473 t di digestato distri-

buito al giorno. Limitatamente a distanze non superiori ai 5 km, infine, il costo operativo complessivo risulta mediamente di 4,5-5 €/m<sup>3</sup>. In condizioni ideali, quindi, con questo cantiere si può ottenere un buon compromesso fra costi operativi e capacità di lavoro, così da poter ammortizzare l'investimento iniziale per la rete interrata di adduzione.

### 6.5 CRITERI DI CONFRONTO E VALUTAZIONE DEI CANTIERI

Per la corretta valutazione dei cantieri nella propria azienda, vanno presi in considerazione diversi aspetti al di là del solo confronto fra i costi operativi. Infatti, affinché il cantiere sia ottimizzato, vanno anche considerati: la struttura dell'azienda, i tempi e le capacità operative, le tempistiche a disposizione, la numerosità e il tipo di mezzi coinvolti. Tutti questi fattori, avranno una priorità differente nella valutazione a seconda della tipicità dell'azienda stessa.

#### Confronto fra costi operativi



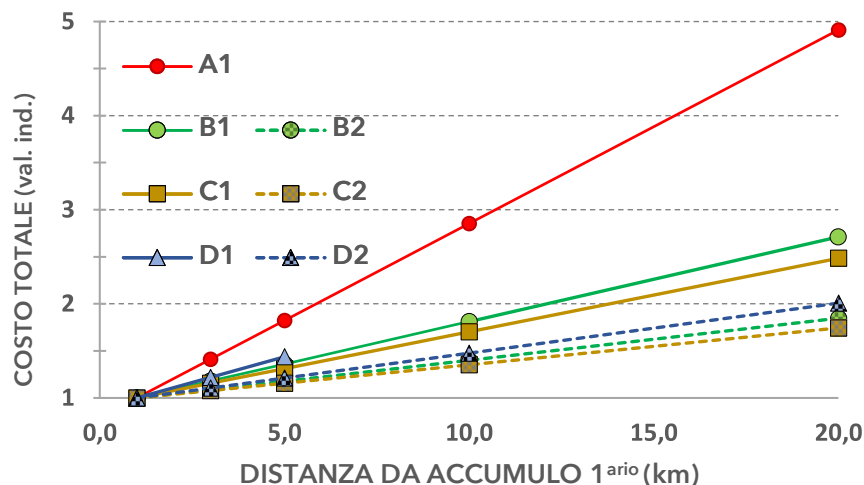
**Figura 29** - Simulazione esemplificativa per mais irriguo: confronto dei costi operativi dei vari cantieri di distribuzione in funzione della distanza dall'accumulo 1<sup>ario</sup> (A1: Carro spandiliquame trainato; B1 Carro botte+balia+spandiliquame trainato; B2 Autocisterna+balia+spandiliquame trainato; C1 Carro botte+balia+spandiliquame semovente; C2 Autocisterna+balia+spandiliquame semovente; D1 e D2 Ombelicale).

I costi operativi sono caratterizzati da due fattori principali: la specializzazione del cantiere che da spandiliquame trainato a semovente comporta costi di distribuzione più elevati a causa delle maggiori tariffe praticate; i costi di trasporto che possono essere ottimizzati sulle lunghe distanze aumentando volumi e velocità di trasferimento (**Figura 29**).

Rispetto a un cantiere che riunisca trasporto e distribuzione, che potrebbe essere conveniente economicamente solo a brevi distanze, sacrificando in parte la capacità di lavoro, tutti i cantieri a gestione separata delle due fasi con macchine specializzate consentono

una migliore capacità di lavoro a costi medi pressoché paragonabili fra le varie soluzioni (mediamente dai 4,5 ai 5,5 €/m<sup>3</sup> fino ai 5 km).

In aggiunta, è possibile, per ciascuno dei sei cantieri simulati, rapportare i costi operativi (trasporto + distribuzione) calcolati alle diverse distanze a quello corrispondente alla distanza minima (1 km) (**Figura 30**). L'incremento di costo viene così indicizzato tenendo conto delle specificità tecnico-operative che differenziano un cantiere rispetto agli altri. Di conseguenza, diversamente dal valore assoluto del costo (€/m<sup>3</sup>), gli indici permettono la comparazione più accurata delle prestazioni economiche dei diversi cantieri al variare della distanza di trasporto. In tal senso, l'analisi della **Figura 30**, evidenzia come l'incremento dei costi operativi totali aumenti all'aumentare della distanza, in misura molto più contenuta per i cantieri B e C, più specializzati e performanti e, fra questi, quelli che impiegano l'autocisterna (B2 e C2). In termini ancor più sintetici, i cantieri più specializzati "ammortizzano" meglio di altri l'incremento dei costi di trasporto, inevitabilmente correlato all'aumento della distanza accumulo-appezzamento.



**Figura 30** - Indice di incremento di costo operativo dei cantieri all'aumentare della distanza.  
(A1: Carro spandiliquame trainato; B1 Carro botte+balia+spandiliquame trainato; B2 Autocisterna+balia+spandiliquame trainato; C1 Carro botte+balia+spandiliquame semovente; C2 Autocisterna+balia+spandiliquame semovente; D1 e D2 Ombelicale).

### Numero di mezzi, capacità operativa di lavoro e periodi utili

Ci sono altri fattori importanti di caratterizzazione e valutazione dei cantieri sulla base dei quali progettare il cantiere.

Il numero di mezzi necessari è variabile in funzione della fase di trasporto con la quale si garantisce l'approvvigionamento del digestato alla macchina di distribuzione. Migliore è l'organizzazione della logistica dei trasporti, maggiore è la possibilità di esprimere la più alta capacità operativa del sistema. Va da sé che l'ottimizzazione del numero di macchine coinvolte è in funzione della distanza, della velocità di percorrenza e dei volumi di

trasporto per ogni mezzo. All'aumentare della distanza, quindi, saranno necessari meno mezzi se questi possono trasferirsi più velocemente e movimentano maggiori volumi (**Tabella 10**).

**Tabella 10** - Numero di mezzi necessari per il trasporto ai fini della migliore ottimizzazione del sistema. I valori riferiti al cantiere A tengono conto che con questa soluzione gli spandiliquame trainati svolgono sia la fase di trasporto, sia di distribuzione (cantiere a operazioni riunite).

	Numero macchine necessarie per il trasporto				
	1km	3km	5km	10km	20km
<b>A - Spandiliquame trainato</b>	2	3	4	6	10
<b>B1 - Carro botte+balia+spandiliquame</b>	1	2	2	4	6
<b>B2 - Autocisterna+balia+spandiliquame</b>	1	2	2	3	4
<b>C1 - Carro botte+balia+semovente</b>	1	2	3	5	9
<b>C2 - Autocisterna+balia+semovente</b>	1	2	2	3	5

Come detto, la buona strutturazione della logistica di trasporto condiziona direttamente la capacità operativa dei cantieri. Tale indice, in relazione alle superfici aziendali e al tempo disponibile per completare le distribuzioni è di fondamentale importanza ai fini della scelta dell'impostazione di cantiere più corretta per l'azienda (**Tabella 11**).

**Tabella 11** - Capacità operativa di lavoro e produttività giornaliera (10 ore di lavoro) dei cantieri analizzati.

	Capacità Operativa Giornaliera (ha/gg)					Produttività operativa giornaliera (t/gg)				
	1km	3km	5km	10km	20km	1km	3km	5km	10km	20km
<b>A - Spandiliquame trainato</b>	7,2	5,1	4,0	2,5	1,5	637	451	349	223	130
<b>B1-B2 - Spandiliquame trainato</b>	10,0					888				
<b>C1-C2 - Spandiliquame semovente</b>	14,4					1274				
<b>D - Tubatura interrata + ombelicale</b>	16,7					1473				

Ne consegue che, riprendendo le condizioni di lavoro impiegate nella precedente simulazione dei cantieri (dose da distribuire 88,4 t/ha per soddisfare ad alta efficienza una coltura di mais), per completare la fertilizzazione di 200 ha di superficie ad una distanza media di 3 km, saranno necessari i seguenti periodi utili:

- circa 40 giorni con il cantiere A
- circa 20 giorni con i cantieri B1 e B2
- circa 14 giorni con i cantieri C1 e C2
- circa 12 giorni con il cantiere D

Stante queste differenze, risulta chiaro come la maggiore capacità di lavoro dei cantieri più specializzati, anche se più costosa rispetto al cantiere convenzionale, consente una gestione più razionale della fertilizzazione organica anche nei periodi di transizione fra prima e seconda coltura in cui la tempestività è un fattore fondamentale.

#### Costo di distribuzione dell'unità fertilizzante

La valutazione del costo di distribuzione dell'unità fertilizzante è un parametro di valutazione utile per considerare fino a quando il costo di fertilizzazione organica risulta conveniente rispetto a una fertilizzazione tradizionale.

Nel caso specifico, ragionando sempre sull'esempio del mais irriguo, si è considerato un costo di fertilizzazione tradizionale che comprende la lavorazione del suolo, la distribuzione e i fertilizzanti (NP localizzato alla semina e N in copertura). Sulla base dei prezzi di mercato attuali delle lavorazioni contoterzi e dei prezzi medi dei fertilizzanti nel periodo 2015-2023 (base dati Camera di Commercio di Ferrara), il costo di distribuzione dell'unità fertilizzante tradizionale risulta come segue:

Ne consegue che, sulla base dei costi operativi dei vari cantieri, è possibile calcolare l'equivalente costo di distribuzione dell'unità fertilizzante anche per il digestato, tenuto conto che con la fertilizzazione organica si apporta NPK alla pari di un fertilizzante organo-minerale (**Tabella 3**).

Minima lavorazione e preparazione del terreno (€/ha)	Fertilizzante semina NP 18/46 (1,5q pari a 27kg di N e 69kg di P) (€/ha)	Fertilizzante copertura Urea 46% (5,5q pari a 253kg di N) (€/ha)	Distribuzione concime (€/ha)	Totale costo di distribuzione (€/ha)	Costo di distribuzione dell'unità fertilizzante (N+P) €/kg di U.F.
<b>215,00</b>	<b>90,77</b>	<b>292,80</b>	<b>70,00</b>	<b>653,75</b>	<b>1,87</b>

Confrontando i due valori di costo di distribuzione dell'unità fertilizzante, si ottiene una rappresentazione del limite di convenienza economica della fertilizzazione organica.

Come si può notare dalla **Tabella 12**, risulta evidente come la fertilizzazione organica effettuata con cantieri adeguati possa risultare conveniente, rispetto alla fertilizzazione classica, anche fino a 10 km di distanza dall'accumulo 1<sup>ario</sup>.

**Tabella 12** - Costo di distribuzione dell'unità fertilizzante con digestato in funzione della distanza dall'accumulo 1<sup>ario</sup>. In verde le soluzioni pienamente convenienti; in giallo convenienti.

Costo di distribuzione dell'unità di N in fertilizzazione organica	€/kg di N				
	1 km	3 km	5 km	10 km	20 km
A - Spandiliquame trainato	0,30	0,42	0,55	0,86	1,48
B1 - Carrobotte+balia+spandiliquame	0,59	0,69	0,80	1,07	1,60
B2 - Autocisterna+balia+spandiliquame	0,65	0,71	0,77	0,91	1,20
C1 - Carrobotte+balia+semovente	0,68	0,79	0,89	1,16	1,69
C2 - Autocisterna+balia+semovente	0,74	0,80	0,86	1,00	1,29
D - Tubatura interrata+ombelicale	0,49	0,59	0,70	0,96	1,49

Nel caso in cui si considerasse anche il valore del carbonio organico che si apporta con il digestato, a differenza dei concimi chimici, la convenienza risulterebbe ancora più marcata.

Utilizzare digestato, quindi, significa soddisfare i fabbisogni delle colture con apporti comparabili a un fertilizzante organo-minerale, ma a costi più convenienti per unità fertilizzante apportata.

In ogni caso, per distanze oltre i 5 km, potrebbe risultare comunque utile una dislocazione degli accumuli nelle varie sezioni di azienda così da mantenere sempre ottimizzata la logistica.



## 7. NOTE E BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE CONSULTATA

### NOTE

1. Decreto 2 marzo 2018 "Promozione dell'uso del biometano e degli altri biocarburanti avanzati nel settore dei trasporti" (GU n. 65 19 marzo 2018)

2. Decreto 15 settembre 2022 "Attuazione degli articoli 11, comma 1 e 14, comma 1, lettera b), del decreto legislativo 8 novembre 2021, n. 199, al fine di sostenere la produzione di biometano immesso nella rete del gas naturale, in coerenza con la Missione 2, Componente 2, Investimento 1.4, del PNRR" (GU n. 251 26 ottobre 2022)

3. Decreto 2 marzo 2018 "Promozione dell'uso del biometano e degli altri biocarburanti avanzati nel settore dei trasporti" (GU n. 65 19 marzo 2018)

4. Decreto 15 settembre 2022, Norma UNI/TS 11567:2020  
<https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2019/05/Manuale-Digestato-31102017.pdf>

5. [https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2024/02/CIB-Federbio\\_Linee-guida-uso-agronomico-digestato-in-agricoltura-biologica.pdf](https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2024/02/CIB-Federbio_Linee-guida-uso-agronomico-digestato-in-agricoltura-biologica.pdf)

6. Il rizobio (*Rhizobium leguminosarum*) è un batterio azotofissatore, molto importante perché instaura una simbiosi sulle radici delle leguminose e fissa per loro l'azoto atmosferico in forma direttamente utilizzabile.

7. Sono indici "derivati" in quanto sono entrambi costruiti da una combinazione di due distinte frequenze di luce. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) misura la riflettività delle piante espressa come rapporto di riflettività nel vicino infrarosso (NIR) meno la riflettività rossa (VIS) rispetto a NIR più VIS e, in tal senso, è un buon indicatore dell'attività fotosintetica. La sua rappresentazione mediante GIS (Geographic Information System), supportata anche da altre informazioni puntuali (rilievi fogliari) fornisce un'ottima rappresentazione spaziale dello stato vegetativo e nutrizionale della pianta, permettendo il monitoraggio rapido ed efficace di grandi superfici. NDRE (Normalized Difference Red Edge) utilizza una combinazione di luce NIR e una banda di frequenza che si trova nella regione di transizione ("Red Edge") tra la luce rossa visibile e la luce NIR. Valori elevati di NDRE corrispondono a maggiori contenuti di clorofilla: il suolo ha i valori molto bassi, le piante malsane valori intermedi, mentre le piante sane e vigorose i valori più elevati. Rispetto a NDVI, questo indice è un indicatore ottimale della salute/vigore della vegetazione in quanto la luce Red Edge è più traslucida alle foglie rispetto alla rossa (con minore probabilità di assorbimento totale). NDVI è più adatto per letture durante il periodo di crescita, ma può perdere di sensibilità quando viene raggiunto un livello critico di copertura fogliare o di contenuto di clorofilla (metà-fine ciclo colturale).

### BIBLIOGRAFIA PRINCIPALE CONSULTATA

Albuquerque, J.A. *et al.* (2012). Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy* 40, 181-189.

Andrade Díaz, Christhel & Albers, Ariane & Zamora-Ledezma, Ezequiel & Hamelin, Lorie (2024). "The interplay between bioeconomy and the maintenance of long-term soil organic carbon stock in agricultural soils: A systematic review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 189(PA).

ARPA Emilia-Romagna Sez. Bologna (2014). Monitoraggio conoscitivo della composizione chimico-fisica e microbiologica del digestato prodotto da impianti a biogas.

ARPAE Emilia-Romagna (2016). Monitoraggio della composizione analitica del digestato prodotto da impianti a biogas "Esi delle attività di monitoraggio. Anno di riferimento 2015".

ARPAV Regione Veneto (2013). Caratteristiche del digestato da impianti di digestione anaerobica.



Campagna di monitoraggio maggio-settembre 2013.

Bonetta S. *et al.* (2010). Hygienic and physico-chemical characterisation of digested products from anaerobic co-digestion of cattle slurry and agricultural by-products. Proceeding Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste.

Cooke J. *et al.* (2023). Characterising the Effect of Raw and Post-Treated Digestates on Soil Aggregate Stability. *Waste Biomass Valor* 14, 2977–2995. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02045-3>

EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ) (2009). Statement on technical assistance related to the EFSA opinion on transformation of Animal By-Products into biogas and compost. *The EFSA Journal* 7 (11): 1370

Egense C. *et al.* (2021). Solid fraction of separated digestate as soil improver: implications for soil fertility and carbon sequestration. *J Soils Sediments* 21, 678–688. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02792-z>

Facchinetti D. (2019). Carri botte spandiliquame: la gestione dei reflui. *Mondo macchina*. <https://www.mondomacchina.it/it/carribotte-spandiliquame-la-gestione-dei-reflui-c2510>

Govasmark E. *et al.* (2011). Chemical and microbiological hazards associated with recycling of anaerobic digested residue intended for agricultural use. *Waste Management* 31 (2011): 2577–2583

Grillo F. *et al.* Agro-Environmental Sustainability of Anaerobic Digestate Fractions in Intensive Cropping Systems: Insights Regarding the Nitrogen Use Efficiency and Crop Performance *Agronomy* 2021, 11, 745. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040745>

Horan N.H. *et al.* (2004). Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion. *Water Research* 38: 1113–1120

Kearney T. *et al.* (1993). The effect of slurry storage and anaerobic digestion on survival of pathogenic bacteria. *Journal of Applied Microbiology*. Volume 74, Issue 1 January 1993 Pages 86–93

Houben S. *et al.* (2022) “Tractical information for soil health” <https://www.best4soil.eu/assets/factsheets/16.pdf>


Kong, F. *et al.* (2023). Does the application of biogas slurry reduce soil N<sub>2</sub>O emissions and increase crop yield?—A systematic review. *Journal of Environmental Management* 342, 118339. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118339>

Mayerová M. *et al.* (2023). Long-term application of biogas digestate improves soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 231, 105715. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105715>

Mauceri C. *et al.* (2023) Agronomic and environmental performance of 6 energy crops in a close loop with digestate fertilization.

*Archives of Agronomy and Soil Science*. Volume 69, 2023 - Issue 15  
<https://doi.org/10.1080/03650340.2023.2241383>

Maynaud G. *et al.* (2016). Persistence and potential viable but non-culturable state of pathogenic bacteria during storage of digestates from agricultural biogas plants. *Frontiers in Microbiology* 7, article 1469



Pessina D. (2017) L'interramento dei liquami di origine agricola. Mondo macchina <https://www.mondomacchina.it/it/l-interramento-dei-liquami-di-origine-agricola-c1742?tbLink=1964>

Pourcher A.M. *et al.* (2015). Persistence of salmonella derby and listeria monocytogenes in digestates derived from pig and dairy farms. Proceedings "XVII International Congress on Animal Hygiene 2015"

Progetto Life HELPSOIL. Linee guida per l'applicazione e la diffusione dell'Agricoltura Conservativa Progetto LIFE (<https://www.reterurale.it/buonepraticheLIFE/helpsoil>)

Progetto GeSEFFE. Gestione sostenibile ed efficiente degli effluenti di allevamento per la fertilizzazione delle colture. <https://costruzionirurali.unimi.it/geseffe-documenti/>  
Ragone A. (2011). Ammendanti: il prelevamento dei campioni finalizzato al controllo microbiologico. Fertilizzanti n. 2/2011

Riva C. *et al.* (2016). Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. Science of The Total Environment 547, 206-214. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>

Rossi L., Mantovi P. Il digestato, un utile sottoprodotto del biogas. Opuscolo Conoscere per Competere, (Settembre 2012)

Rossi L. *et al.* (2016). Biogas, stato igienico-sanitario dei digestati agrozootecnici. L'Informatore Agrario, 43: 51-54

Rossi L. *et al.* (2017). Clostridi, convivenza possibile tra biogas e prodotti dop. L'Informatore Agrario, 3: 69-72

Sartori L., Gasparini F., Pezzuolo A. (2014). Tecniche di distribuzione degli effluenti zootecnici e agro-energetici. [https://www.venetoagricoltura.org/upload/File/erbacee\\_bollettino/SartoriCompleto%20E512.pdf](https://www.venetoagricoltura.org/upload/File/erbacee_bollettino/SartoriCompleto%20E512.pdf)

Veneto Agricoltura "TECNICHE DI DISTRIBUZIONE DEGLI EFFLUENTI ZOOTECNICI E AGRO-ENERGETICI" Progetto LIFE AQUA (<https://www.venetoagricoltura.org/upload/pubblicazioni/AQUA%20E511-512-513-514/Completo%20E512.pdf>)

Zilio M. *et al.* (2020). Evaluation of ammonia and odour emissions from animal slurry and digestate storage in the Po Valley (Italy). Waste Management 103, 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.038>

Zilio M. *et al.* (2023). Nitrogen dynamics in soils fertilized with digestate and mineral fertilizers: A full field approach. Science of the Total Environment <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161500>



**CIB - Consorzio Italiano Biogas**

Parco Tecnologico Padano  
Via Einstein s.n.c  
26900 Lodi  
[consorziobiogas.it](http://consorziobiogas.it)