



Azienda Agricola Bagnod - - 14 Maggio 2024
Strada Boschetto 33, Piverone (TO)

FOCUS DIGESTATO

La distribuzione ottimizzata del digestato:
valutazioni tecnico-economiche dei cantieri innovativi in aziende-tipo



Marco Fiala

Università degli Studi di Milano «La Statale»

Dipartimento Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA)



++39 02 503 16868



marco.fiala@unimi.it



- a) Impiego agronomico del **digestato** → Cantieri di lavoro **alta efficienza** (meccanica ed economica, agronomica con pieno valorizzazione della risorsa) e **ridotti impatti ambientali**
- b) Modello aperto (implementabile) → **8 cantieri** studiando separatamente le fasi di: (i) TRASPORTO, (ii) DISTRIBUZIONE
- c) **Cantiere di trasporto** → **garantire un flusso costante di digestato (t/h), pari alla produttività massima della macchina di distribuzione**
- d) Sequenziamento delle due fasi in più **operazioni**:

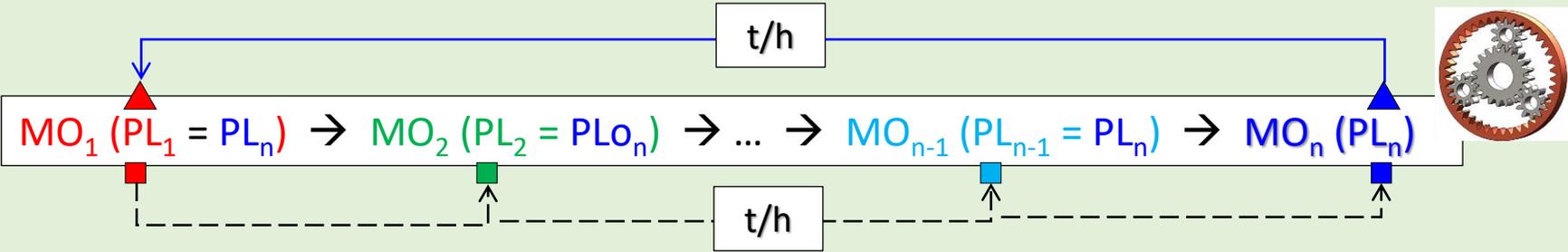
TRASPORTO

1. **Riempimento 1** (→ riempimento serbatoio + accessori)
2. **Trasferimento** (→ andata + ritorno + accessori)
3. **Riempimento 2** (→ riempimento serbatoio + accessori)

DISTRIBUZIONE

1. **Entrata-Uscita dal campo** (d prefissata)
2. **Spandimento** (→ erogazione + svolte + accessori)

- e) Tragitto di trasporto suddiviso in **4 tipologie stradali diverse** (stoppie, sterrato, asfalto, altro)
- f) Per ciascuna tipologia stradale, **2 velocità di trasferimento** (a vuoto, a pieno carico) e di distribuzione (uscita, entrata in campo)



CALCOLARE PRESTAZIONI

1. **meccaniche** delle singole macchine e del cantiere nel suo complesso
2. **economiche** (costi operativi) → contoterzisti (tariffe locali, indic. agr.)

t/h; m³/h
ha/h; ha/giorno

€/t; €/m³; €/kg N

**AL VARIARE DELLA
DISTANZA DI TRASPORTO
(d; km)**



| | | | | |
|--------------------------------------|-----------|------------------|----|------------|
| | Mais | A _{sc1} | ha | 120 |
| | Sorgo | A _{sc2} | ha | 120 |
| Superficie a 1 coltura | | A _{sc} | ha | 240 |
| | Tritical. | | | 90 |
| | Mais | A _{dc1} | ha | 90 |
| | Loietto | | | 20 |
| | Mais | A _{dc2} | ha | 20 |
| Superficie a 2 colture | | A _{dc} | ha | 110 |
| Superficie coltivata (totale) | | A _{tot} | ha | 460 |

| PRODOTTO: Digestato | | | | | |
|---|------------------------------------|--------------------|--------------|------------------------------------|-------------------|
| Densità | ρ | kg/dm ³ | 1,020 | | |
| Solidi Totali | % TQ | % | 5,28% | | |
| Contenuto NTK | N% | g/kg | 3,36 | g/m ³ | 3,43 0,34% |
| Contenuto P ₂ O ₅ | P ₂ O ₅ % | g/kg | 1,17 | g/m ⁴ | 1,19 0,12% |
| Contenuto K ₂ O | K ₂ O% | g/kg | 3,50 | g/m ⁵ | 3,57 0,35% |
| Dose limite N | m _{Nmax} | kg/ha | 350 | MAIS: 280 kg/ha N; efficienza: 0,8 | |

DOSE m_{Nmax}/N%
104,2 t/ha



| TRAGITTO ACCUMULO 1 ^{ario} - CAMPO | | | | | | |
|---|----|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Stoppie | km | 0,15 | | | | |
| Sterrato | km | 0,05 | 0,1 | 0,3 | 1,0 | 2,5 |
| Asfalto | km | 0,45 | 0,9 | 2,7 | 9,0 | 22,5 |
| Altro | km | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Distanza | km | 0,50 | 1,0 | 3,0 | 10,0 | 25,0 |

DISTANZA SIMULATE



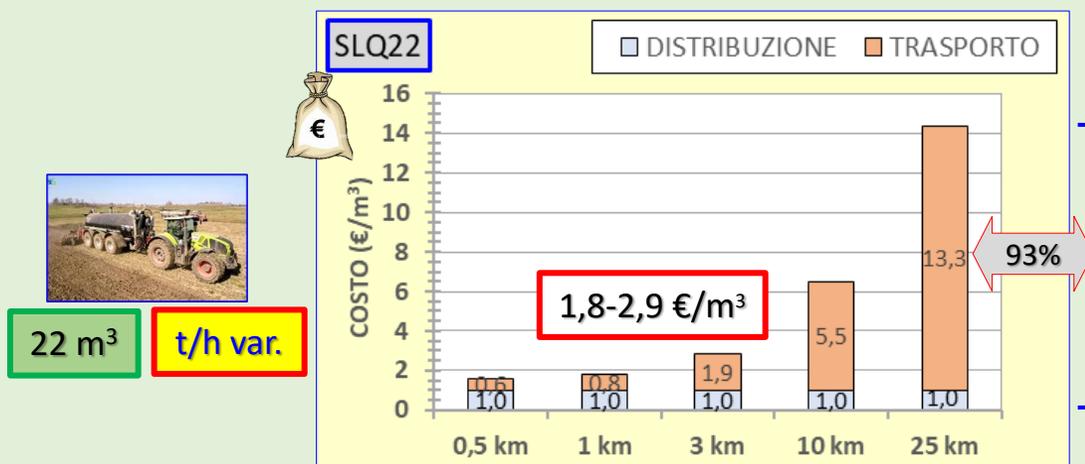
DIGESTATO



| | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE | SUOLO |
|--------------------------|---|---|--|--------------------|
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE | |
| SLQ22 | TR + <u>Spandiliquame</u> (22 m ³) con distributore | | | Minima lavorazione |
| CBT22+BAL70+SLQ15 | TR + <u>Carrobotte</u> (22 m ³) | Carro Balia (70 m ³) | TR + <u>Spandiliquame</u> (15 m ³) | |
| CST31+BAL70+SLQ15 | <u>Autocisterna</u> (31 m ³) | | | |
| CBT22+BAL70+SMV16 | TR + <u>Carrobotte</u> (22 m ³) | | Spandiliquame semovente (16 m ³) | |
| CST31+BAL70+SMV16 | <u>Autocisterna</u> (31 m ³) | | | |
| CBT22+BAL70+OMB4 | TR + <u>Carrobotte</u> (22 m ³) | Carro Balia (70 m ³) + TR + Irrig. rotolo | TR + Ombelicale | |
| CST31+BAL70+OMB4 | <u>Autocisterna</u> (31 m ³) | | | |
| TBZ+IRR+OMB | <u>Rete tubazioni interrate</u> | TR + Irrig. rotolo | | |



| | | | |
|----------------|--|----------------------------|---------------------|
| D = 104,2 t/ha | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE |
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE |
| SLQ22 | TR + Spandiliquame (22 m ³) con distributore | | |



22 m³ t/h var.

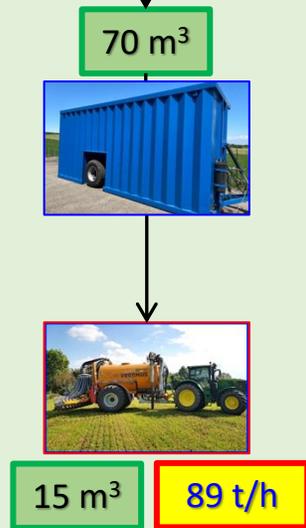
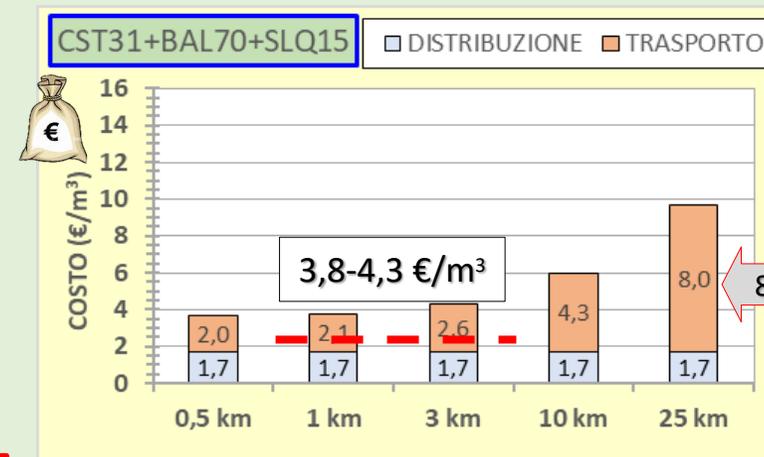
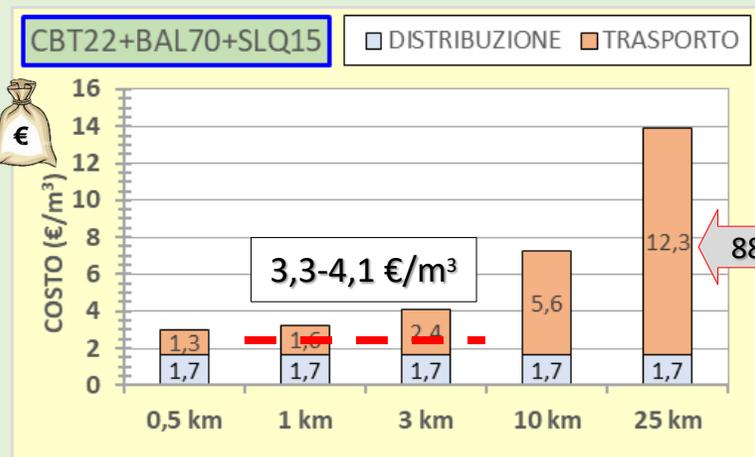
Media tecnologia (DST: 1,0 €/m³), soluzione molto diffusa (parco aziendale, contoterzisti) → **confronto**

PRESTAZIONI MECCANICHE

N° MEZZI: 0,5 km: 2 - 1 km: 2 - 3 km: 3 - 10 km: 6 - 25 km: 14
 PRODUTTIVITA': 91 t/h (0,5 km) → 10 t/h (25 km) CAPACITA': 0,9 ha/h (0,5 km) → 0,1 ha/h (25 km)
 GIORNI UTILI (D: 104,2 t/ha) → 1a (240 ha): 27-251 giorni. 2a (110 ha): 15-115 giorni



| D = 104,2 t/ha | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE |
|-------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE |
| CBT22+BAL70+SLQ15 | TR + Carrobotte (22 m ³) | Carro Balia (70 m ³) | TR + Spandiliquame (15 m ³) |
| CST31+BAL70+SLQ15 | Autocisterna (31 m ³) | | |



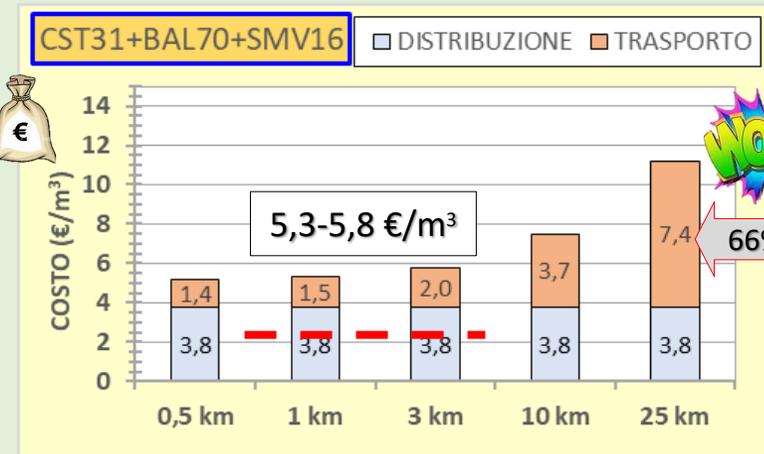
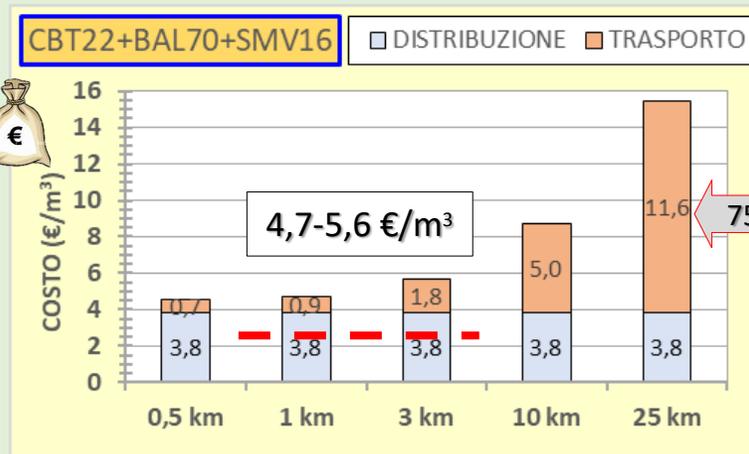
Macchina di distribuzione più leggera (- **compattamento**), elevata tecnologia (DST: 1,7 €/m³), qualità lavoro

PRESTAZIONI MECCANICHE

N° CARRIBOTTE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 1 - 10 km: 4 - 25 km: 9
 N° AUTOCISTERNE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 1 - 10 km: 3 - 25 km: 5
 PRODUTTIVITA': **96 t/h** CAPACITA' LAVORO: **0,9 ha/h**
 GIORNI UTILI (D: 104,2 t/ha) → 1a (240 ha): **26 giorni**. 2a (110 ha): **12 giorni**



| D = 104,2 t/ha | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE |
|-------------------|--|-------------------------------------|---|
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE |
| | CBT22+BAL70+SMV16 TR + <u>Carrobotte</u> (22 m ³) | Carro Balia (70 m ³) | Spandiliquame semovente (16 m ³) |
| CST31+BAL70+SMV16 | <u>Autocisterna</u> (31 m ³) | | |



22 m³

70 m³



16 m³ 137 t/h



31 m³

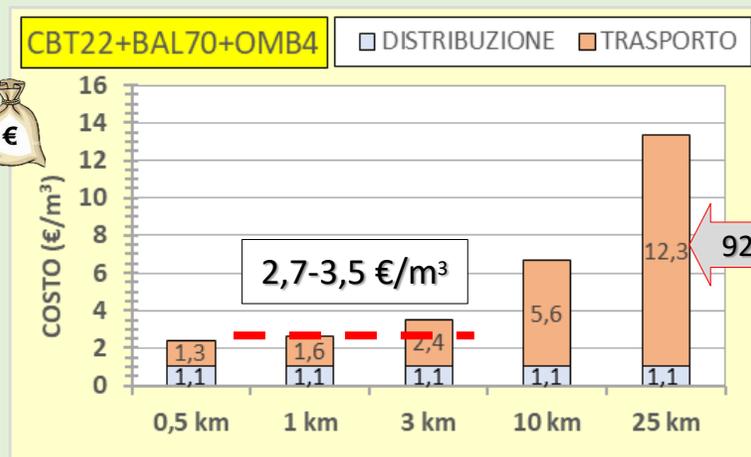
Alta efficienza nella distribuzione, elevatissima tecnologia (DST: 3,8 €/m³), elevata qualità lavoro

PRESTAZIONI MECCANICHE

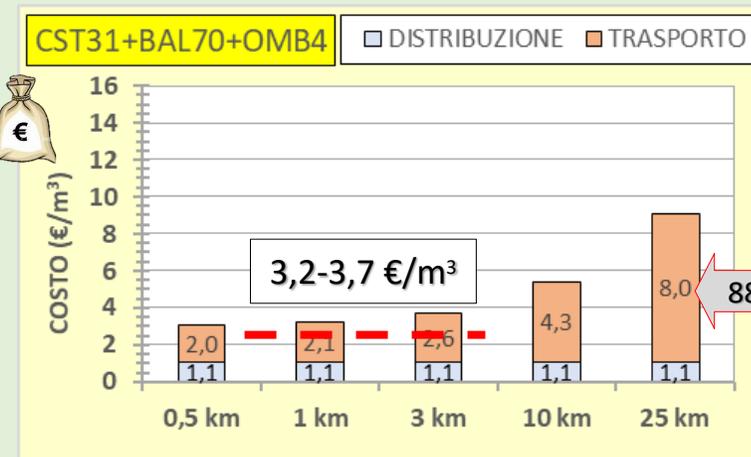
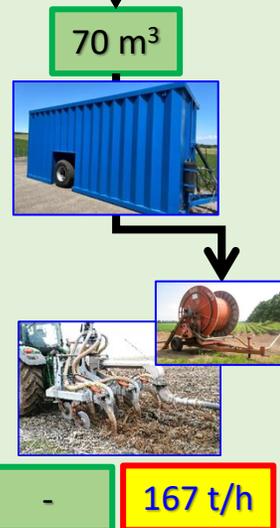
N° CARRIBOTTE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 2 - 10 km: 6 - 25 km: 13
 N° AUTOCISTERNE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 2 - 10 km: 4 - 25 km: 7
 PRODUTTIVITA': 137 t/h CAPACITA' LAVORO: 1,3 ha/h
 TEMPESTIVITA' INTERVENTO (D: 104,2 t/ha) → 1a (240 ha): 18 giorni. 2a (110 ha): 8 giorni



| | | | |
|-------------------------|--------------------------------------|---|---------------------|
| D = 104,2 t/ha | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE |
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE |
| CBT22+BAL70+OMB4 | TR + Carrobotte (22 m ³) | Carro Balia (70 m ³) + TR + Irrig. rotolo | TR + Ombelicale |
| CST31+BAL70+OMB4 | Autocisterna (31 m ³) | | |



22 m³



31 m³

Distribuzione **ottimale per minimizzare compattamento**, media tecnologia (DST: 1,1 €/m³), elevata qualità lavoro

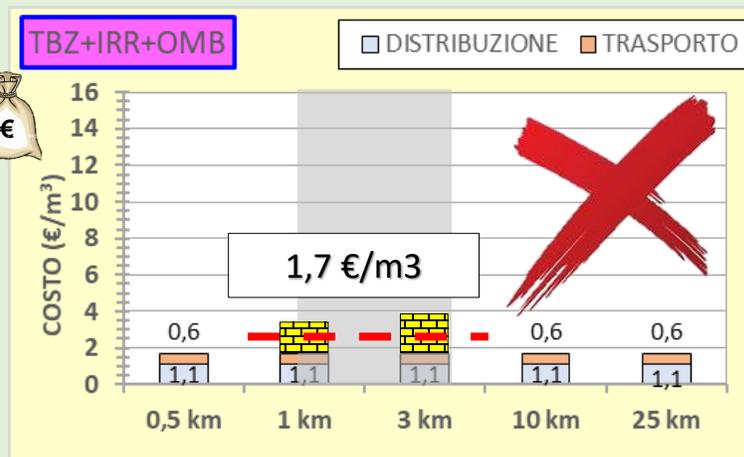
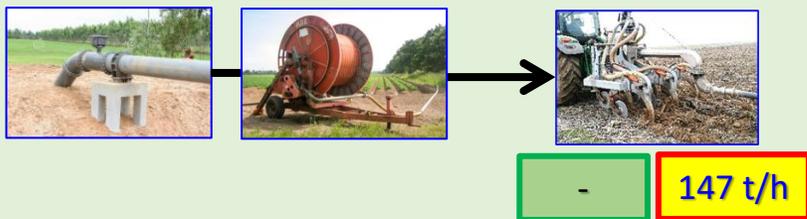
PRESTAZIONI MECCANICHE

N° CARRIBOTTE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 3 - 10 km: 7 - 25 km: 16
 N° AUTOCISTERNE (trasporto): 0,5 km: 1 - 1 km: 1 - 3 km: 2 - 10 km: 4 - 25 km: 9
 PRODUTTIVITA': 167 t/h CAPACITA' LAVORO: 1,6 ha/h
 GIORNI UTILI (D: 104,2 t/ha) → 1a (240 ha): 15 giorni. 2a (110 ha): 7 giorni



| | | | |
|----------------|--------------------|----------------------------|---------------------|
| D = 104,2 t/ha | APPROVVIGIONAMENTO | | DISTRIBUZIONE |
| | CARICO E TRASPORTO | ACCUMULO 2 ^{ario} | MACCHINA OPERATRICE |
| TBZ+IRR+OMB | Rete interrata | TR + Irrig. rotolo | TR + Ombelicale |

COSTO ESERCIZIO RETE INTERRATA (€/m³) ?
 1900-2000 €/anno (90 gg) →
 21-22 €/gg → 0,14-0,15 €/m³



Distribuzione **ottimale per minimizzare compattamento**, media tecnologia (DST: 1,1 €/m³), elevata qualità lavoro. Costi rete

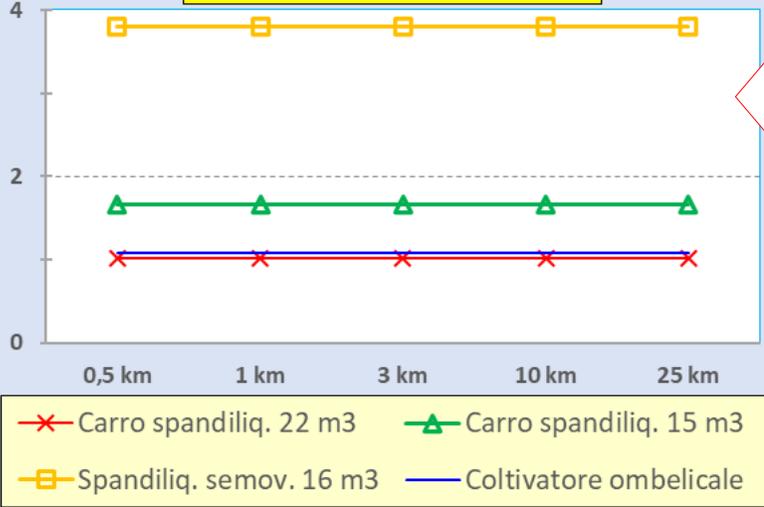
PRESTAZIONI MECCANICHE

N° MEZZI (trasporto): **nessuno**
 PRODUTTIVITA': **167 t/h** CAPACITA' LAVORO: **1,6 ha/h**
 GIORNI UTILI (D: 104,2 t/ha) → 1a (240 ha): **15 giorni**, 2a (110 ha): **7 giorni**



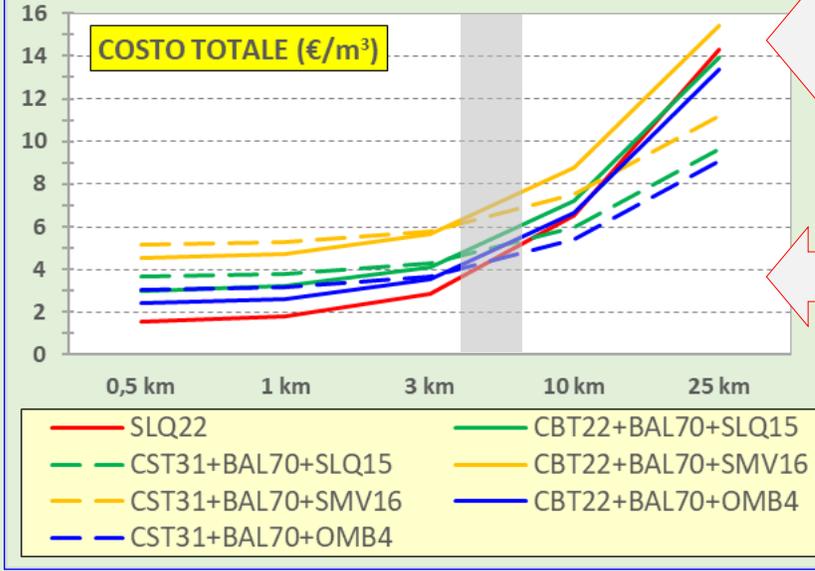
COSTI OPERATIVI (€/m³): VALUTAZIONI COMPARATIVE

COSTI DISTRIBUZIONE (€/m³)



La distribuzione con macchine ad elevato livello tecnologico ed efficienza qualitativa (spandiliquame semoventi, 16 m³) ha costi sensibilmente maggiori (2-4 volte) rispetto alle altre soluzioni

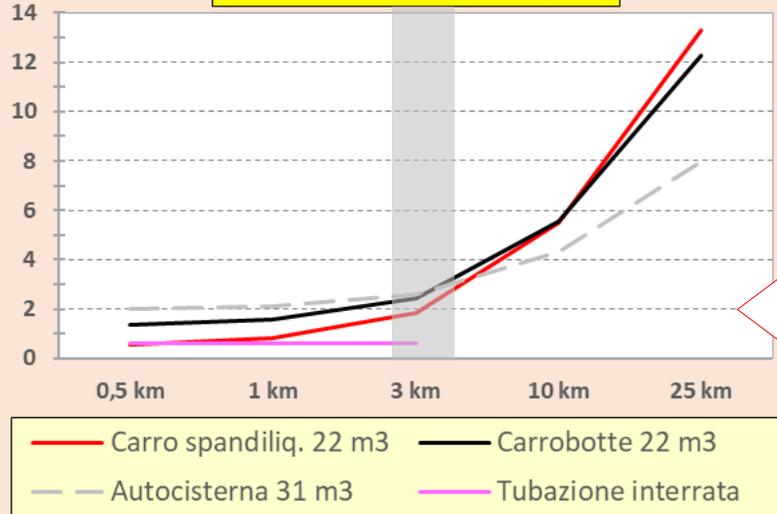
COSTO TOTALE (€/m³)



Fino a **d ≤ 5 km**: la soluzione più competitiva è lo spandiliquame trainato (22 m³). Seguono soluzioni con coltivatore ombelicale e spandiquame trainato (15 m³), e spandiliquame semoventi.

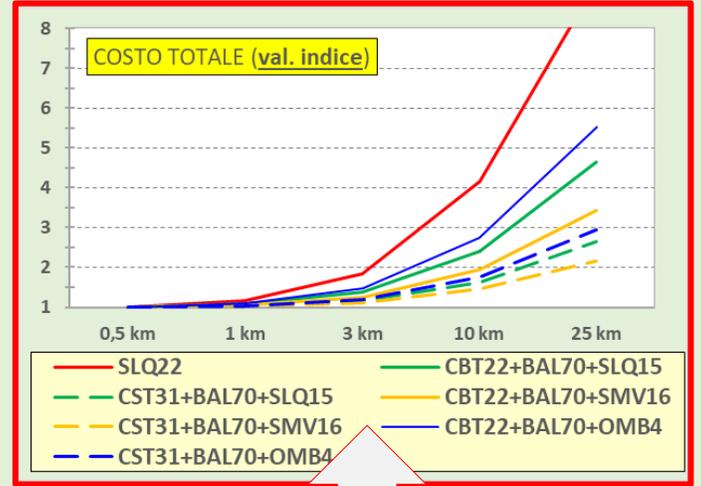
Con **d > 5 km**: la competitività dell'impiego dell'autocisterna riduce tanto più sensibilmente i costi unitari quanto maggiore è la distanza (linee tratteggiate)

COSTI DI TRASPORTO (€/m³)



Con **d > 3-4 km** l'impiego della autocisterna (31 m³) è sempre più conveniente. Con **d < 3 km** - eccezion fatta per la tubazione interrata - lo spandiquame trainato (22 m³) ha i costi minori.

COSTO TOTALE (val. indice)



Tutti i cantieri con autocisterna (linee tratteggiate) risentono meno dell'aumento del costo dovuto alla crescente distanza.

| CODICE | COSTI TOTALI (€/m ³) | | | | |
|-------------------|----------------------------------|------|------|-------|-------|
| | €/m ³ | | | | |
| | 0,5 km | 1 km | 3 km | 10 km | 25 km |
| SLQ22 | 1,6 | 1,8 | 2,9 | 6,5 | 14,3 |
| CBT22+BAL70+SLQ15 | 3,0 | 3,2 | 4,1 | 7,2 | 13,9 |
| CST31+BAL70+SLQ15 | 3,7 | 3,8 | 4,3 | 6,0 | 9,7 |
| CBT22+BAL70+SMV16 | 4,5 | 4,7 | 5,6 | 8,8 | 15,4 |
| CST31+BAL70+SMV16 | 5,2 | 5,3 | 5,8 | 7,5 | 11,2 |
| TBZ+IRR+OMB | 1,7 | 1,7 | 1,7 | | |
| CBT22+BAL70+OMB4 | 2,4 | 2,6 | 3,5 | 6,7 | 13,3 |
| CST31+BAL70+OMB4 | 3,1 | 3,2 | 3,7 | 5,4 | 9,1 |

| | | |
|---|---|---|
| Min: 0,9-1,9 €/m ³ Max: 2,1-2,6 €/m ³ Med: 1,1-2,3 €/m ³ | Min: 1,0 €/m ³ Max: 3,8 €/m ³ Med: 2,0 €/m ³ | Min: 1,8-2,9 €/m ³ Max: 5,3-5,8 €/m ³ Med: 3,5-4,3 €/m ³ |
|---|---|---|

Due fattori condizionano l'aumento dei costi totali: (i) grado di specializzazione delle macchine → correlato all'aumento dei costi di distribuzione (tariffe maggiori), (ii) distanza → correlata all'aumento dell'onere di trasporto → peraltro ottimizzabile con aumento di: (i) volumi e (ii) velocità di percorrenza.

Ne deriva che i cantieri a fasi riunite (SLQ22) sono convenienti (**≤ 2,9 €/m³**) a distanze d < 3 km, oltre le quali la produttività si riduce (con possibile eccessivo prolungamento del periodo di intervento); i cantieri a fasi separate con macchine specializzate - pur registrando **costi operativi sempre ≥ 2,6 €/m³** - hanno **elevata efficienza, produttività** e quindi **permettono grande tempestività**.

CAPACITÀ (ha/h) E PRODUTTIVITÀ (t/h) – TABELLA DI SINTESI

| CANTIERE | CAPACITÀ LAVORO (ha/h) | | | | | PRODUTTIVITÀ LAVORO (t/h) | | | | |
|--|------------------------|------|-------------|-------|-------|---------------------------|------|-----------|-------|-------|
| | 0,5 km | 1 km | 3 km | 10 km | 25 km | 0,5 km | 1 km | 3 km | 10 km | 25 km |
| SLQ22 | 0,88 | 0,75 | 0,48 | 0,21 | 0,10 | 91 | 78 | 50 | 22 | 10 |
| CBT22+BAL70+SLQ15 CST31+BAL70+SLQ15 | 0,9 ← + 1,9 volte → | | | | | 96 | | | | |
| CBT22+BAL70+SMV16 CST31+BAL70+SMV16 | 1,3 ← + 2,7 volte → | | | | | 137 | | | | |
| CBT22+BAL70+IRR+OMB4 CST31+BAL70+IRR+OMB4 | 1,6 ← + 3,3 volte → | | | | | 167 | | | | |



MAGGIORE CAPACITÀ → MAGGIORE TEMPESTIVITA'
 Az. Bagnod: 240 ha 1° Coltura + 110 ha 2a Coltura
 Se tutti appezzamenti a 3 km, dose: 104,2 t/ha

| 1a COLT | 2a COLT |
|-----------|-----------|
| 50 giorni | 23 giorni |
| 26 giorni | 12 giorni |
| 18 giorni | 8 giorni |
| 15 giorni | 7 giorni |

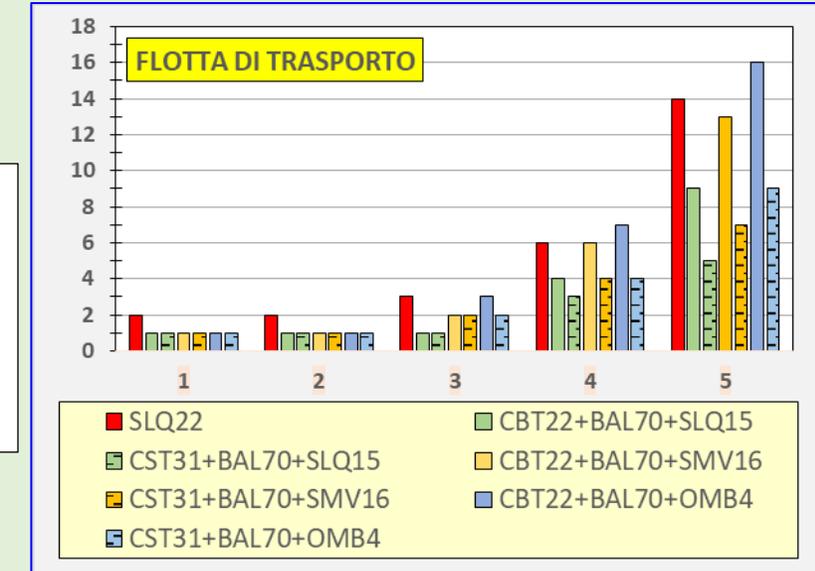
PERIODO UTILE
 RIDOTTO TRA 1a e 2a
 COLTURA !!



FLOTTA MEZZI TRASPORTO - TABELLA DI SINTESI

| CANTIERE | NUMERO MACCHINE | | | | |
|--|-----------------|------|------|-------|-------|
| | 0,5 km | 3 km | 5 km | 10 km | 25 km |
| SLQ22 (* anche distribuzione) | 2* | 2* | 3* | 6* | 14* |
| CBT22+BAL70+SLQ15 CST31+BAL70+SLQ15 | 1 | 1 | 1 | 4 | 9 |
| CBT22+BAL70+SMV16 CST31+BAL70+SMV16 | 1 | 1 | 2 | 6 | 13 |
| CBT22+BAL70+IRR+OMB4 CST31+BAL70+IRR+OMB4 | 1 | 1 | 3 | 7 | 16 |

MAGGIOR NUMERO →
 + COMPLESSITA' ORGANIZZ.
 + CONSUMI
 + IMPATTO AMBIENT.
 + INCONVENIENTI
 + TRAFFICO



COMPARAZIONE TRA IL COSTO DA SOSTENERE PER LA COPERURA DEI FABBISOGNI AZOTATI (kg N/ha) DELLA COLTURA MEDIANTE FERTILIZZANTI MINERALE (Urea 46%; S_{MIN} ; €/kg N) E ANALOGO COSTO MEDIANTE FERTILIZZAZIONE ORGANICA CON DGESTATO (S_{DGS} ; €/kg N) → SE $S_{DGS} < S_{MIN}$ → PIU' ECONOMICA LA FERTILIZZAZIONE ORGANICA

ESEMPIO:
MAIS FABBISOGNO
280 kg N/ha

MINIMA LAVORAZIONE
215 €/ha

UREA 46% (465 €/t)
608 kg/ha → 283 €/ha

DISTRIBUZIONE
70 €/ha

→ 568 €/ha

S_{MIN} (€/kg N) = 568/280 = 2,03 €/kg N

$S_{DGS} < S_{MIN}$

DA TITOLO N (3,36 g/t) E DENSITA' (1020 kg/m³) DEL DIGESTATO → I COSTI OPERATIVI DEI CANTIERI DA €/m³ A €/kg N

| CANTIERE | COSTI TOTALI (€/kg N) | | | | |
|-------------------|-----------------------|------|------|-------|-------|
| | €/kg N | | | | |
| | 0,5 km | 1 km | 3 km | 10 km | 25 km |
| SLQ22 | 0,46 | 0,53 | 0,84 | 1,90 | 4,18 |
| CBT22+BAL70+SLQ15 | 0,88 | 0,94 | 1,20 | 2,11 | 4,06 |
| CST31+BAL70+SLQ15 | 1,07 | 1,11 | 1,25 | 1,75 | 2,82 |
| CBT22+BAL70+SMV16 | 1,32 | 1,38 | 1,64 | 2,56 | 4,51 |
| CST31+BAL70+SMV16 | 1,51 | 1,55 | 1,69 | 2,19 | 3,26 |
| CBT22+BAL70+OMB4 | 0,70 | 0,77 | 1,03 | 1,94 | 3,89 |
| CST31+BAL70+OMB4 | 0,90 | 0,93 | 1,08 | 1,58 | 2,65 |

DELOCALIZZAZIONE
ACCUMULI

CONCLUSIONI

Cantieri a fasi riunite: MO convenzionali, larga gamma di volumi ($10 \div 30 \text{ m}^3$), robuste e operativamente adattabili. Diffusione: elevata. Tecnologia: medio livello.

- Spandiliquame trainato (22 m^3): Specializzazione: medio. Influenza fase trasporto: molto elevata (con $d > 4 \text{ km}$ → produttività ridotta → durata prolungata intervento). Tempi accessori: elevati. Compattamento: molto elevato.

Costi operativi: $\leq 3,0 \text{ €/m}^3 (d \leq 3 \text{ km}) \quad \geq 6,5 \text{ €/m}^3 (d \geq 10 \text{ km})$

Cantieri a fasi separate: MO specializzate. Diffusione: limitata. Tecnologia: elevata.

- Spandiliquame trainato (15 m^3): Specializzazione: elevata. Influenza fase trasporto: elevata (con $d > 3 \text{ km}$ auspicabile impiego autocisterna). Tempi accessori: contenuti. Compattamento: contenuto.

Costi operativi: $\leq 4,5 \text{ €/m}^3 (d \leq 3 \text{ km}) \quad \geq 6,0 \text{ €/m}^3 (d \geq 10 \text{ km, con autocisterna})$

- Spandiliquame semovente (16 m^3): Specializzazione: molto elevata. Influenza fase trasporto: elevata (con $d > 4 \text{ km}$ → auspicabile impiego autocisterna). Tempi accessori: molto contenuti. Compattamento: molto contenuto.

Costi operativi: $\leq 6,0 \text{ €/m}^3 (d \leq 3 \text{ km}) \quad \geq 7,5 \text{ €/m}^3 (d \geq 10 \text{ km, con autocisterna})$

- Coltivatore ombelicale: Specializzazione: media. Influenza fase trasporto: elevata (con $d > 4 \text{ km}$ → auspicabile impiego autocisterna). Tempi accessori: minimi. Compattamento: minimo.

Costi operativi: $\leq 3,7 \text{ €/m}^3 (d \leq 3 \text{ km}) \quad \geq 5,5 \text{ €/m}^3 (d \geq 10 \text{ km, con autocisterna})$.

Con rete di tubazioni interrati (assenza mezzi meccanici di trasporto), si ha la minimizzazione di costi di trasporto ($\leq 0,6 \text{ €/m}^3$, per irrigatore a rotolo). Occorre tuttavia aggiungere i costi di esercizio della rete, da valutare necessariamente caso per caso in funzione delle ore di impiego complessive (fertilizzazione on coltivatore ombelicale, irrigazione).