



Azienda Agricola Cazzola – 10 Ottobre 2024

Via Spolverine, 1164, 37056 Salizzole (VR)

<https://www.agricolacazzola.it/2021/11/24/articolo-di-prova-due/>

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**:

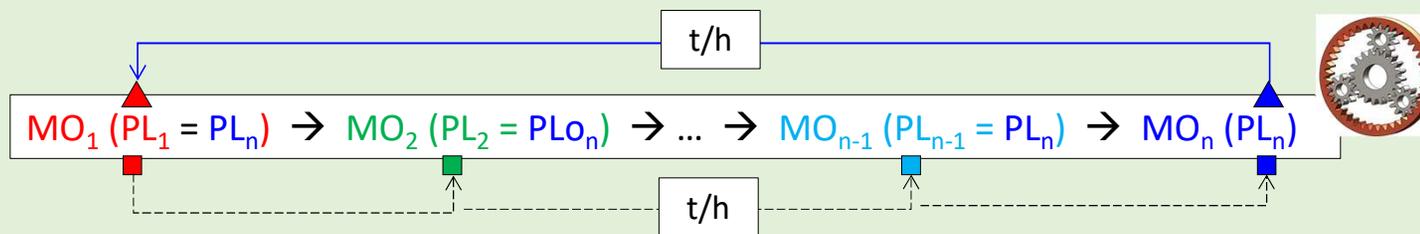
TRASPORTO

- 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)**

APPLICAZIONE DEL MODELLO ALL' AZIENDA CAZZOLA (SALIZZOLE): PARAMETRI AZIENDALI



				1° R	2° R	
Frumento t&d	A _{c1}	ha		537		V
Mais	A _{c2}	ha		370	260	P
Colza	A _{c3}	ha		40		V
Pisello da industria	A _{c4}	ha		264		V
Pomodoro da industria	A _{c5}	ha		150		P
Sorgo	A _{c6}	ha			465	P
Fieno e insilati	A _{c7}	ha		90		V
Medica	A _{c8}	ha		60		
Soia	A _{c9}	ha			200	P
...	A _{c10}	ha				
Superficie coltivata	A_c	ha		1511	925	

COLTURE VERNINE [V]
931 ha

FRUMENTO
537 ha

COLTURE PRIMAVERILI P]
1445 ha

MAIS
630 ha



CARATTERISTICHE FERTILIZZANTE ORGANICO			
MATERIALE	DENSITA'	SOLIDI TOTALI	SOLIDI VOLATILI
DIGESTATO	ρ	ST	SV
STATO	t/m ³	%	%
FL	1,020	5,70%	98,36%

COLTURE PRIMAVERILI (mais):
280 kg/ha N; efficienza: 80% → DOSE D_{DIG} = 105 t/ha

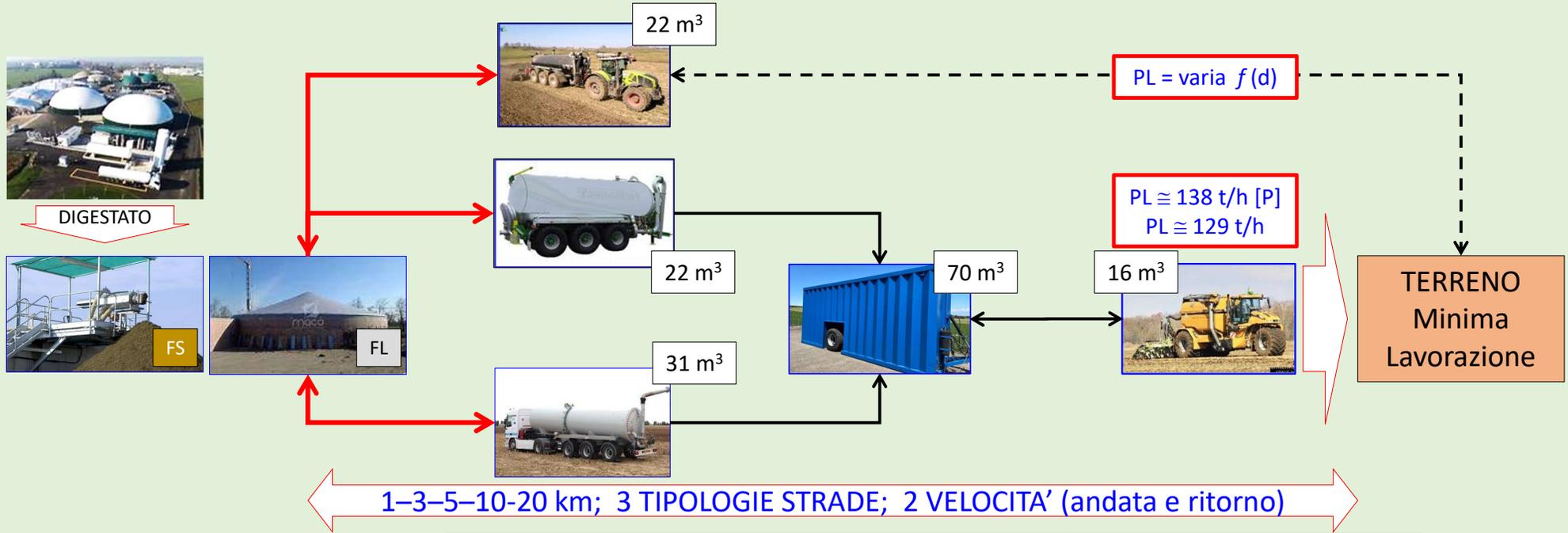
ANALISI CHIMICA				
mg/kg SS	kg/t SS	kg/t TQ	kg/m ³	%
N_{TOT}				
62124	62,1	3,54	3,61	0,35%
P₂O₅				
13328	13,3	0,76	0,77	0,08%
K₂O				
52487	52,5	2,99	3,05	0,30%

COLTURE VERNINE:
180 kg/ha N; efficienza: 60% → DOSE D_{DIG} = 90 t/ha

TRAGITTO ACCUMULO 1 ^{ario} - CAMPO						
Stoppie	TF1	km	0,15			
Sterrato	TF2	km	0,10	0,3	0,5	1,0
Asfalto	TF3	km	0,90	2,7	4,5	9,0
Altro	TF4	km	0,00	0,0	0,0	0,0
Distanza totale	d	km	1,00	3,0	5,0	10,0
						20,0

DISTANZA SIMULATE

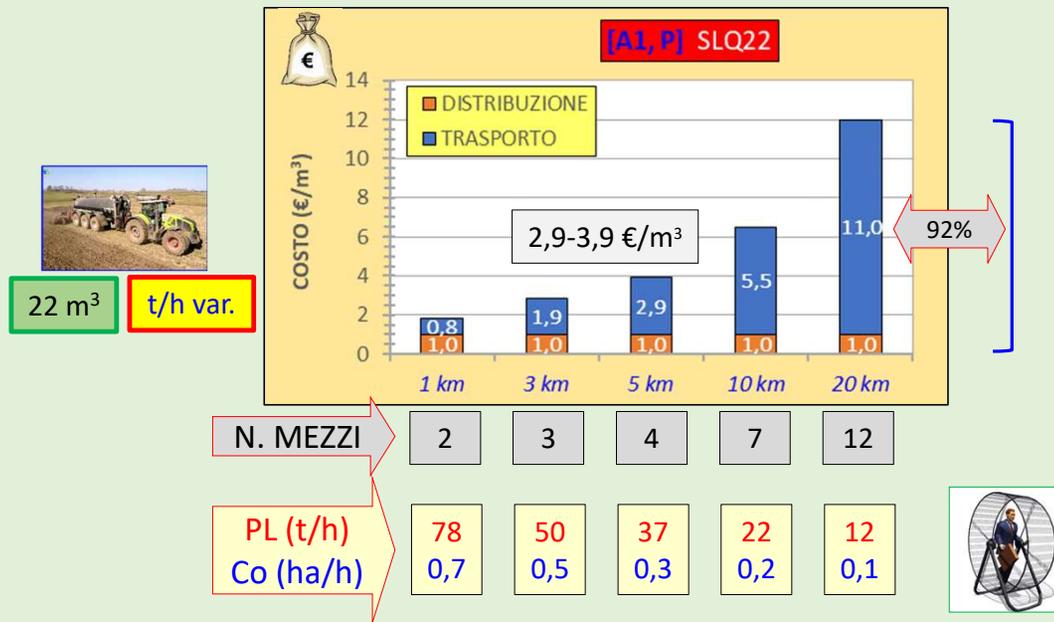
3 CANTIERI: ANALIZZATI PER % DISTANZE DI TRASPORTO DEL DIGESTATO



	APPROVVIGIONAMENTO		DISTRIBUZIONE
	CARICO E TRASPORTO	ACCUMULO 2 ^{ario}	MACCHINA OPERATRICE
SLQ22	TR + <u>Spandiliquame</u> (22 m ³) con distributore		
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)		

SPANDILQUAME (TRIASSE) TRAINATO 22 m³ → **RISULTATI SU PRIMAVERILI**

D = 105 t/ha	APPROVVIGIONAMENTO		DISTRIBUZIONE
	CARICO E TRASPORTO	ACCUMULO 2 ^{ario}	MACCHINA OPERATRICE
SLQ22	TR + Spandilquame (22 m ³) con distributore		



22 m³ t/h var.

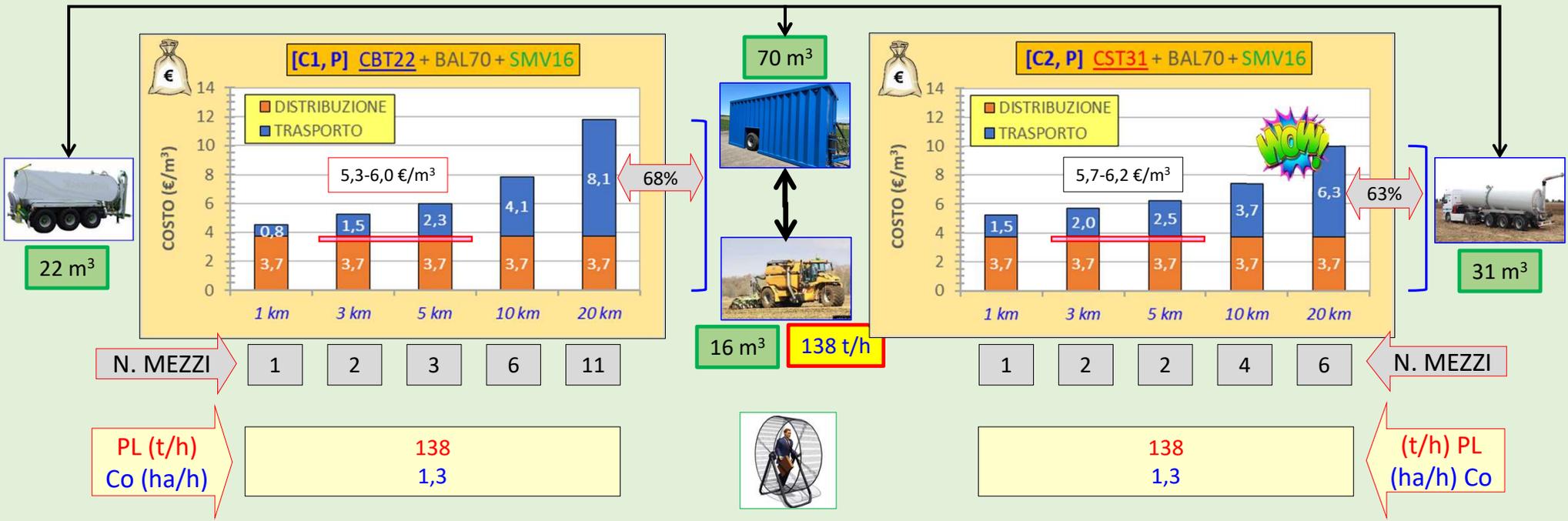
N. MEZZI	2	3	4	7	12
PL (t/h)	78	50	37	22	12
Co (ha/h)	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1



Costi Approvvigionamento: ****; Costi Distribuzione: * (DST: 1,0 €/m³); Tecnologia: ***; Qualità lavoro ***; Tempestività: **

SPANDILQUAME SEMOVENTE 16 m³ → **RISULTATI SU PRIMAVERILI**

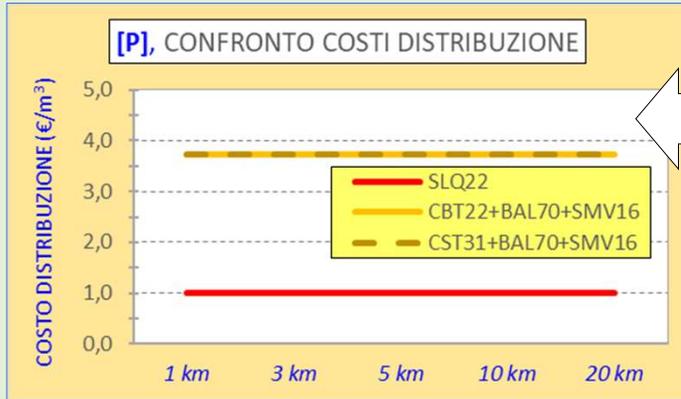
D = 105 t/ha	APPROVVIGIONAMENTO		DISTRIBUZIONE
	CARICO E TRASPORTO	ACCUMULO 2 ^{ario}	MACCHINA OPERATRICE
CBT22+BAL70+SMV16	TR + Carrobotte (22 m ³)	Carro Balia (70 m ³)	Spandilquame semovente (16 m ³)
CST31+BAL70+SMV16	Autocisterna (31 m ³)		



N. MEZZI	1	2	3	6	11		
PL (t/h)				138			
Co (ha/h)				1,3			

Costi Approvvigionamento: **; Costi Distribuzione: *** (DST: 3,7 €/m³), Tecnologia: ****; Qualità lavoro ****; Tempestività: ****

COSTI OPERATIVI (€/m³): VALUTAZIONI COMPARATIVE (PRIMAVERILI)

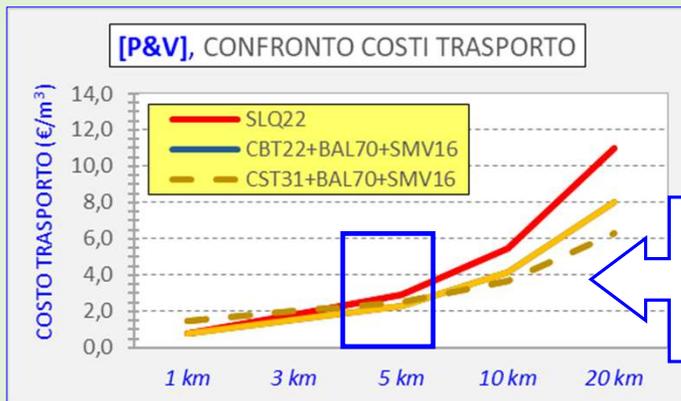


La distribuzione con macchine a elevato livello tecnologico ed efficienza qualitativa (spandilquame semoventi, 16 m³) ha costi sensibilmente maggiori (3-4 volte) rispetto a spandilquame trainato



Fino a $d \leq 6$ km: la soluzione più competitiva è lo spandilquame trainato (22 m³). Impiegando spandilquame semoventi (16 m³), meglio carrobotte

Con $d > 6$ km: l'uso della autocisterna (31 m³, istogramma tratteggiato) riduce i costi tanto più sensibilmente quanto maggiore è la distanza (d)



Con $d > 5-6$ km l'uso della autocisterna (31 m³) è sempre più conveniente. Con $d < 3$ km lo spandilquame trainato (22 m³) ha i costi minori - anche di approvvigionamento.



L'uso dell'autocisterna (linea tratteggiata) comporta aumenti di costo unitario molto poco influenzati dall'aumento della distanza.

COSTI OPERATIVI (€/m³): QUADRO COMPLESSIVO (PRIMAVERILI)

CODICE	COSTI TOTALI (€/m ³)				
	€/m ³				
	1 km	3 km	5 km	10 km	20 km
SLQ22	1,8	2,9	3,9	6,5	12,0
CBT22 + BAL70 + SMV16	4,5	5,3	6,0	7,9	11,8
CST31 + BAL70 + SMV16	5,2	5,7	6,2	7,4	10,0

Due fattori condizionano l'aumento dei costi totali:

- grado di specializzazione delle macchine → correlato all'aumento dei costi di distribuzione (tariffe maggiori) **POCO OTTIMIZZABILE**
- distanza → correlata all'aumento dei costi di trasporto → **OTTIMIZZABILE** (aumento: (i) volumi, (ii) velocità di percorrenza).

Ne deriva che i cantieri

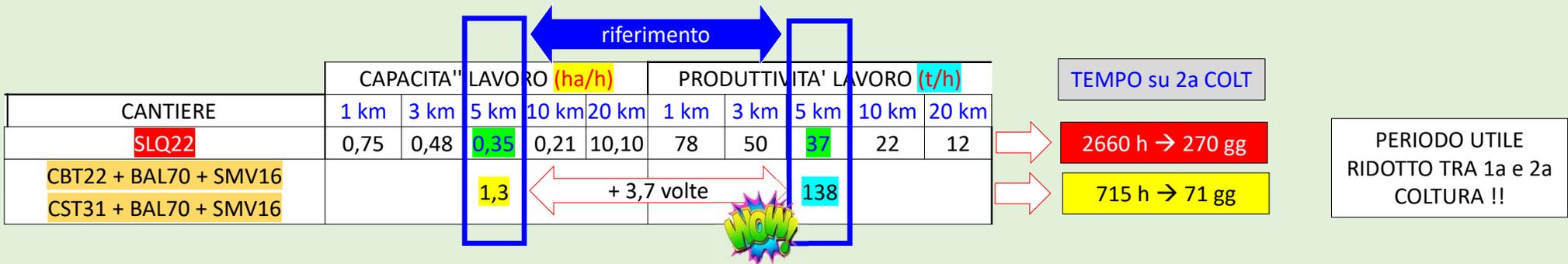
- a fasi riunite (SLQ22) sono convenienti ($\leq 4 \text{ €/m}^3$) a distanze $d < 5 \text{ km}$
- a fasi separate con macchine ad elevato livello tecnologico - pur registrando costi **sempre $\geq 7 \text{ €/m}^3$** - sono convenienti - a distanze $d > 10 \text{ km}$

VALUTAZIONI COMPARATIVE: TEMPESTIVITA' E FLOTTA MEZZI DI TRASPORTO (PRIMAVERILI)

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

MAGGIORE CAPACITA' LAVORO = MAGGIORE TEMPESTIVITA' DI INTEERVENTO

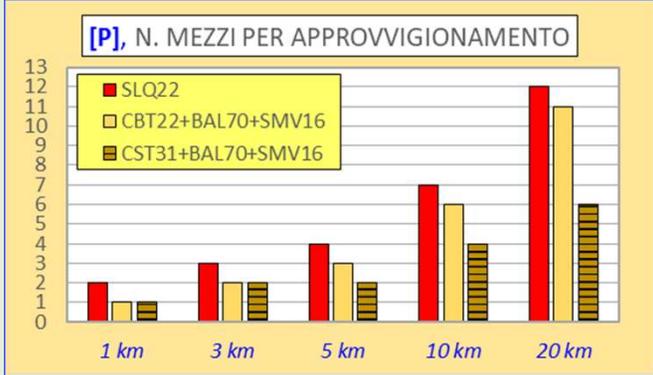
Az. Cazzola: circa 1500 ha colture 1° R (periodi utile: 40 gg) + 930 ha colture 2° R (periodi utile: 10 gg) SE tutti campi a d = 5 km a dose: D_{dig} = 105 t/ha



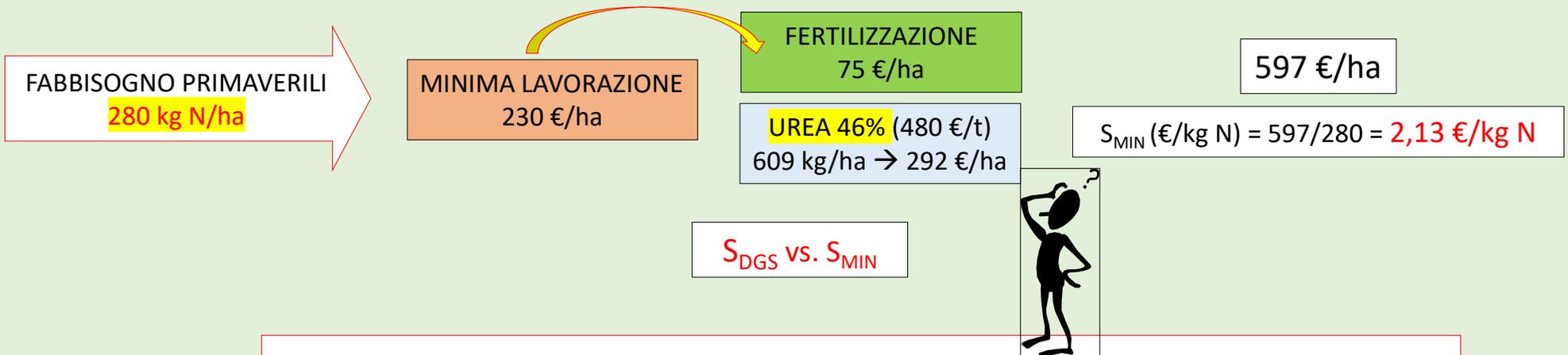
FLOTTA MEZZI TRASPORTO - TABELLA DI SINTESI

CANTIERE	NUMERO MACCHINE				
	1 km	3 km	5 km	10 km	20 km
SLQ22 (* anche distribuzione)	2*	3*	4*	7*	12*
CBT22 + BAL70 + SMV16	1	2	3	6	11
CST31 + BAL70 + SMV16	1	2	2	4	6

MAGGIOR NUMERO =
 + COMPLESSITA' ORGANIZZ.
 + CONSUMI
 + IMPATTO AMBIENTALE
 + INCONVENIENTI MECCAN.
 + TRAFFICO LOCALE



COMPARAZIONE TRA IL COSTO DA SOSTENERE PER LA COPERTURA 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



DAL TITOLO N DEL DIG FL (N% = 3,61 g N/m³) SI CONVERTONO I COSTI OPERATIVI DA €/m³ A €/kg N, CONSENTENDO IL CONFRONTO CON ANALOGO APPORTO CON N MINERALE

CANTIERE	COSTI TOTALI				
	€/kg N				
	1 km	3 km	5 km	10 km	20 km
SLQ22	0,50	0,79	1,08	1,80	3,32
CBT22 + BAL70 + SMV16	1,25	1,46	1,66	2,18	3,26
CST31 + BAL70 + SMV16	1,45	1,58	1,72	2,06	2,78

DELOCALIZZAZIONE ACCUMULI
RIDEFINIZIONE LOGISTICA TRASPORTI AZIENDALI

CONCLUSIONI

L'IMPIEGO AGRONOMICO DEL DIG PUO' COPRIRE IN GRAN PARTE O TOTALMENTE I FABBISOGNI DI N DELLE COLTURE

Cantieri a fasi riunite: MO convenzionali, gamma volumi (10÷30 m³), robuste e operativamente adattabili.

Diffusione: elevata. Tecnologia: medio livello.

- **Spandiliquame trainato** (22 m³): Specializzazione: medio. Influenza fase trasporto: molto elevata (con d > 4 km → produttività ridotta → durata prolungata intervento). Tempi accessori: elevati. Compattamento: molto elevato.

COSTI COMPETITIVI ≤ 4 €/m³ PER DISTANZE d < 5 km

Cantieri a fasi separate: MO specializzate, gamma volumi (15÷22 m³), operativamente adattabili.

Diffusione: limitata. Tecnologia: elevata.

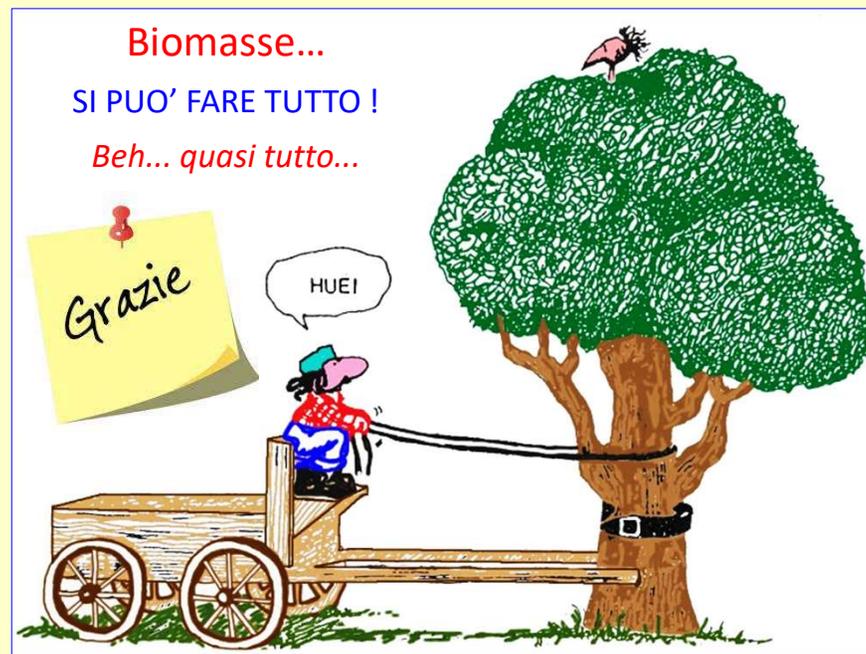
- **Spandiliquame semovente** (16 m³): Specializzazione: molto elevata. Influenza fase trasporto: elevata (con d > 4 km → auspicabile impiego autocisterna). Tempi accessori: molto contenuti. Compattamento: molto contenuto.

COSTI COMPETITIVI > 7 €/m³ PER DISTANZE d > 10 km

MA... IL COSTO UNITARIO (€/m³) NON E L'UNICO PARAMETRO DA CONSIDERARE PER LA SCELTA OTTIMALE

I CANTIERI A FASI SEPARATE HANNO ALTRI VANTAGGI ESTREMAMENTE IMPORTANTI

- produttività lavoro → tempestività dell'intervento (specie nel breve periodo tra raccolta 1° coltura e semina 2a coltura)
- efficienza di distribuzione e accuratezza di localizzazione
- proprietà chimico-fisiche del terreno (compattamento)
- mezzi coinvolti (contenimento emissioni)

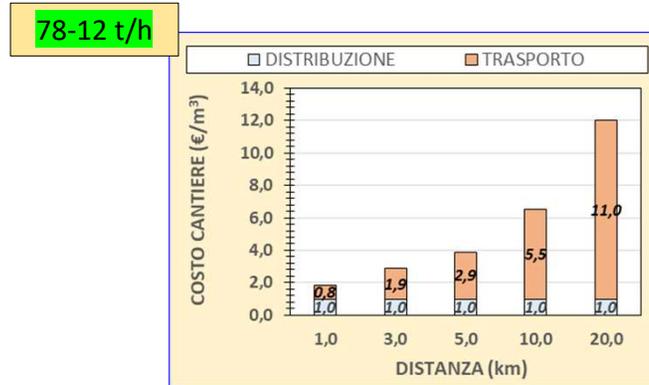
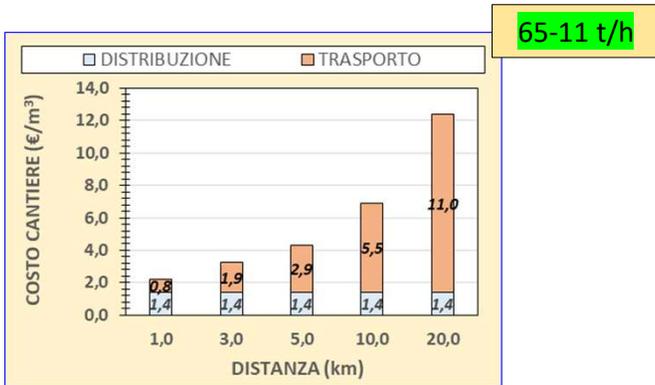


Prof. Marco Fiala ☎ ++39 02 503 16868 ✉ marco.fiala@unimi.it
Dipartimento Scienze Agrarie e Ambientali. Produzione, Territorio, Agroenergia
CV: <https://www.unimi.it/it/ugov/person/marco-fiala>

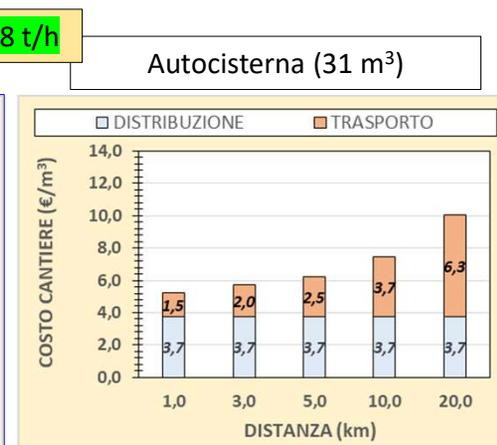
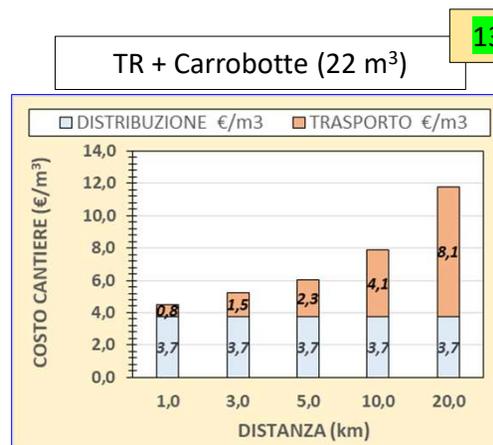
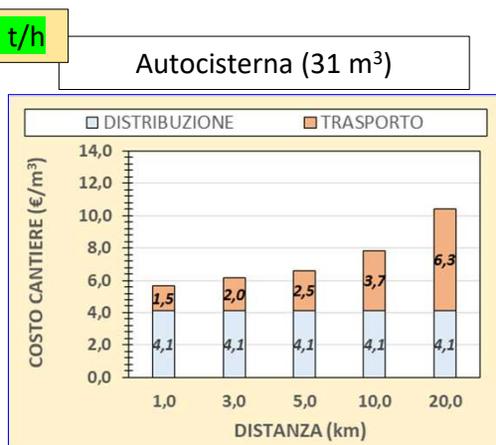
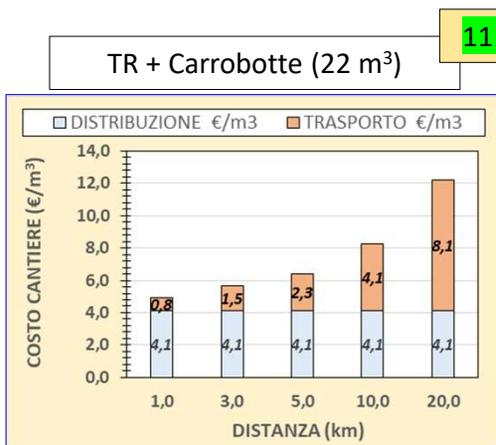
Colture Vernine ($D_{max} N = 239 \text{ kg/ha} \rightarrow D = 68 \text{ t/ha}$)

Colture Primaveraili ($D_{max} N = 372 \text{ kg/ha} \rightarrow D = 105 \text{ t/ha}$)

TR + Spandiliquame triasse (22 m³)



Autocisterna (31 m³) o TR + Carrobotte (22 m³) + Balia (70 m³) + Spandiliquame semovente (16 m³)

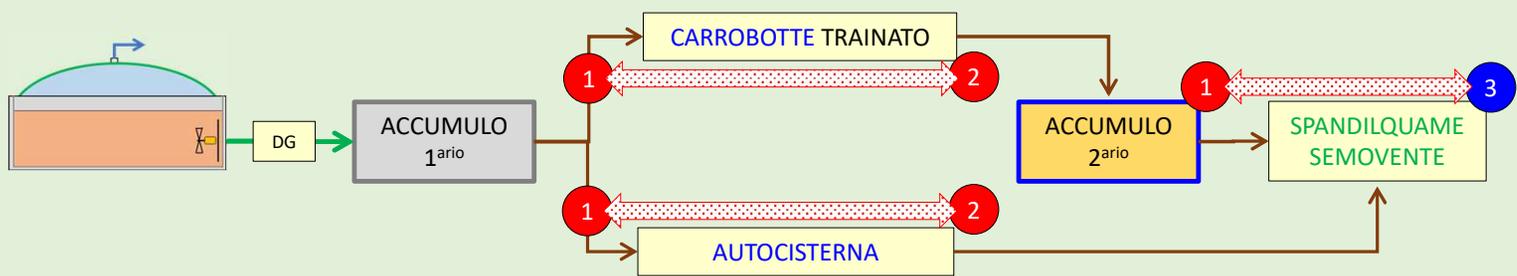




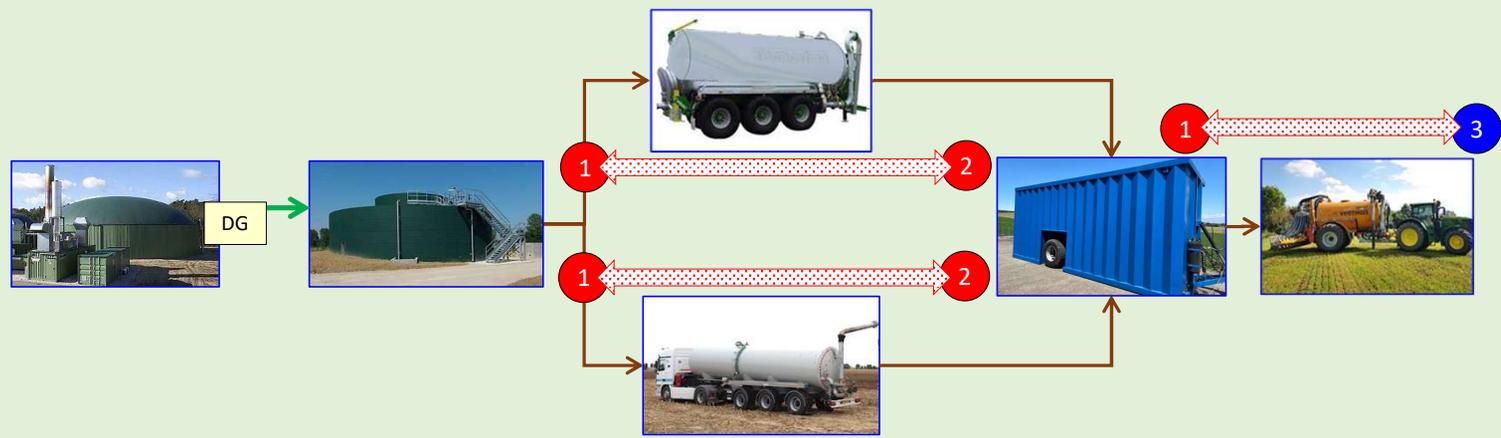
A



B1 e B2: CARROBOTTE TRAINATO 22 m³ /AUTOCISTERNA 31 m³ + CARRO BALIA 70 m³ + SPANDILQUAME TRAINATO 15 m³

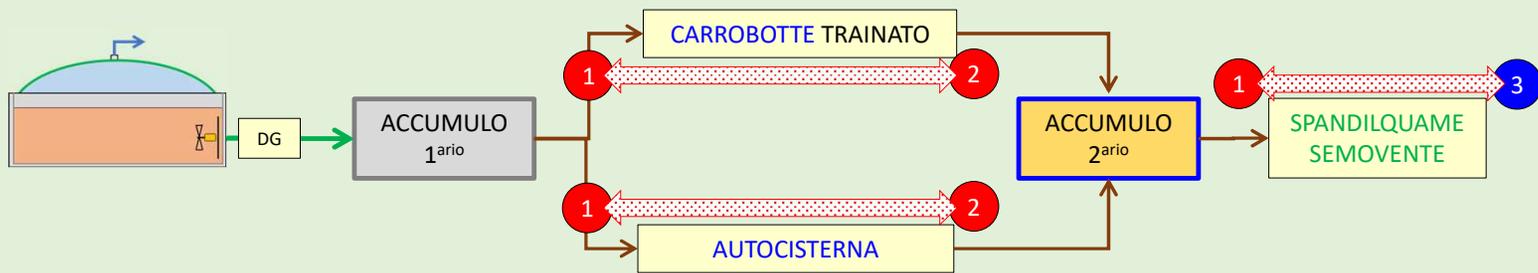
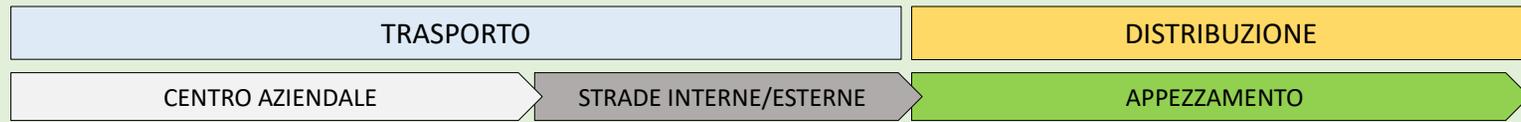


B1

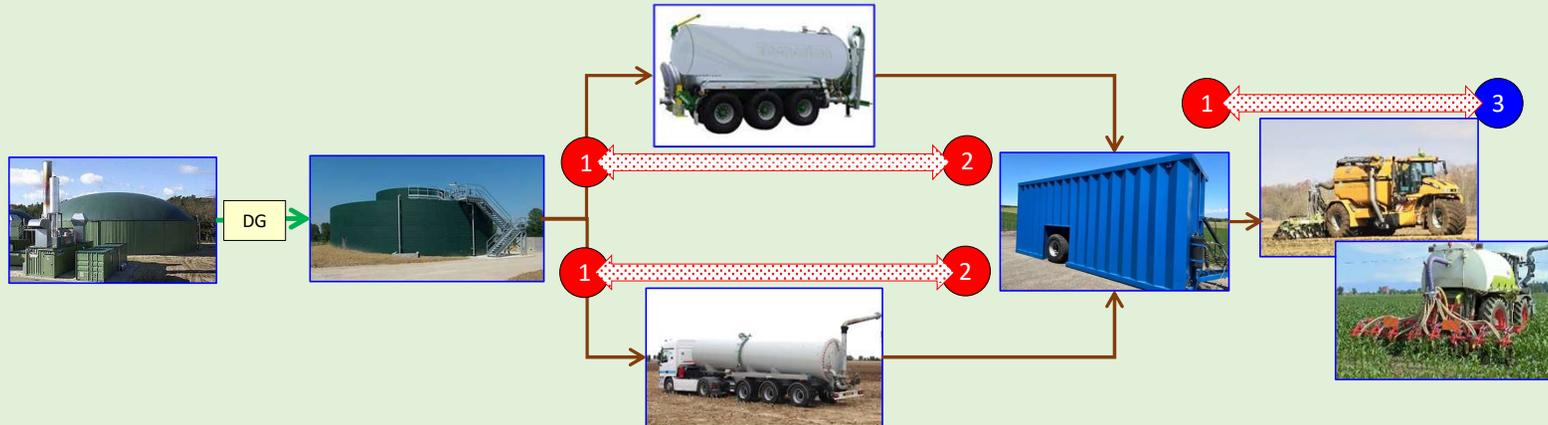


B2

C1 e C2: CARROBOTTE TRAINATO 22 m³/AUTOCISTERNA 31 m³ + CARRO BALIA 70 m³ + SPANDILQUAME SEMOVENTE 16 m³

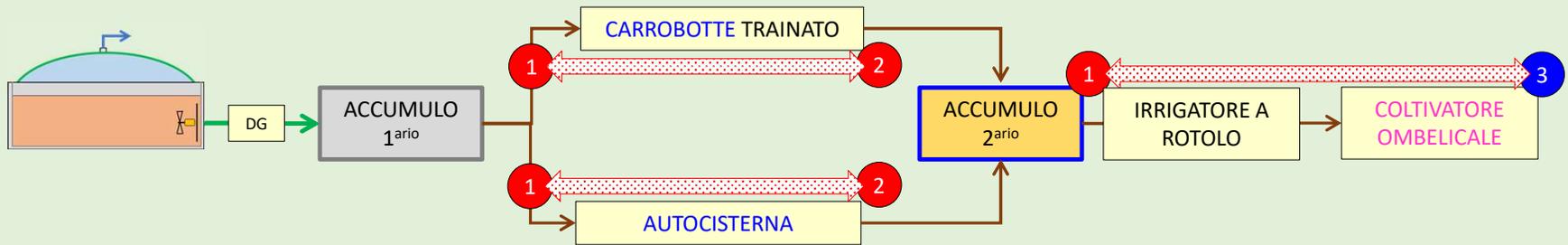
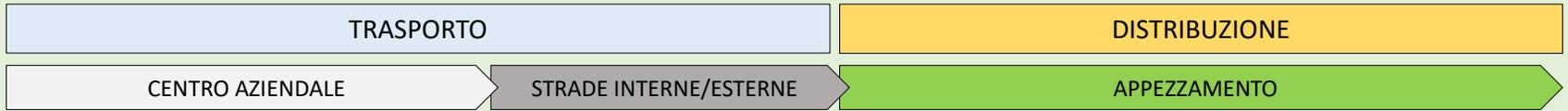


C1

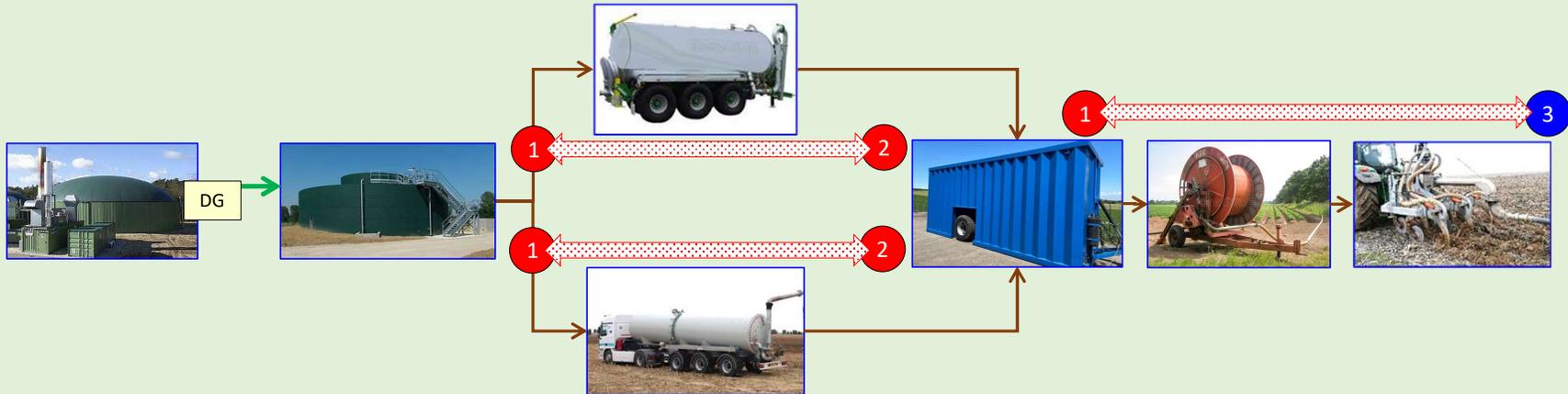


C2

B1 e B2: CARROBOTTE TRAINATO 22 m³ /AUTOCISTERNA 31 m³ + CARRO BALIA 70 m³ + SPANDILIQUAME TRAINATO 15 m³

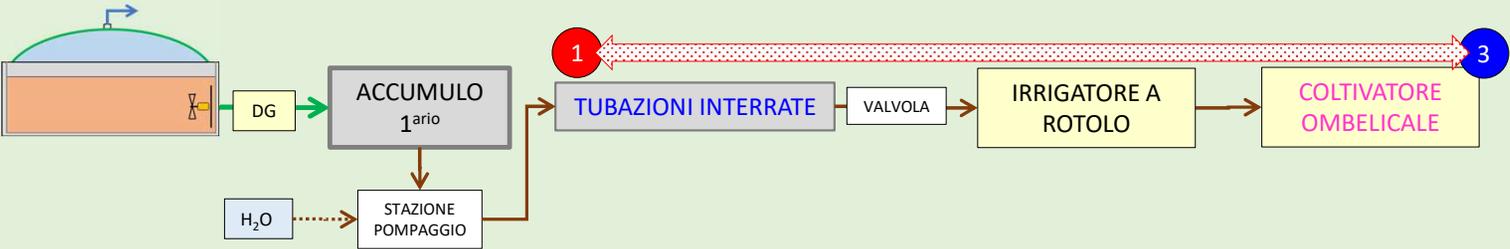


D1



D2

D1: RETE INTERRATA (≤ 3 km) + IRRIGATORE A ROTOLO + COLTIVATORE OMBELICALE



D3



SIMULAZIONE

Coltura: Mais irriguo; Fabbisogno N: 280 kg N; Distanza campo: 1,0 – 3,0 – 5,0 – 10,0 – 20,0 km
 Digestato: liquido, cont. N = 3,96 g/t; $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$, $\eta_D = 80\%$, \rightarrow Dose distrib.: 88,4 t/ha

IMPOSTA CARATT. TECNICHE MO e TARIFFA CONTOT.

SPANDILQUAME SEMOVENTE

			OP1: R1	OP2: TR	OP3: SC	OP4: R2	OP5: D	X
			ns					
	[s/n] >>		n	n	n	s	s	B[+]
Caratteristiche serbatoio	V_{MO}	dm^3	16000	[+]		m_{DG}	t	16,3
Larghezza utile distribuzione	b_u	m	5,0					

LA MO ESEGUE SOLO LA DISTRIBUZIONE (DST)
 LA PLo E' FISSA (non dipende da d). DIGITA VALORE >> t/h 109,0

VELOCITA' E TEMPI ACCESSORI

			OP5: D	OP2: TR		
			Stoppie	Sterrato	Asfalto	Altro
Velocità Ritorno (vuoto)	v_{a1}	km/h	9,0	0,0	0,0	0,0
Velocità Andata (pieno)	v_{a2}	km/h	7,0	0,0	0,0	0,0
Incidenza tempi accessori	k_{aT1-T2}	%	10,0%	0,0%	0,0%	0,0%

RIEMP_1, SCARICO, RIEMP_2, DISTRIBUZIONE

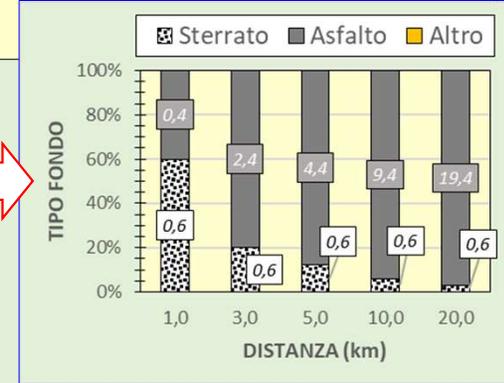
			OP1: R1	OP3: SC	OP4: R2	OP5: D
Portate pompe	Q	dm^3/min	Q = 0	Q = 0	Q > 0	Q > 0
			0	0	10000	309
Incidenza tempi accessori	k_{aR1s}	%	0,0%	0,0%	10,0%	5,0%
Incidenza tempi di svolta	k_{SV}	%				10,0%

TARIFFA CONTOTERZISTI

		€/h	€/ha	€/m ³	☺
APP+DST (OP1 --> OP5)		n		0,0	0,0
APP (solo OP1, OP2, OP3)		n		0,0	0,0
DST (solo OP4, OP5)		s		0,0	3,0
DST AGGIUNTIVI (solo OP5)		n	75	0,9	0,9

TRAGITTO ACCUMULO 1^{ario} - CAMPO

Stoppie	km	0,15	stoppie e sterrato costanti			
Sterrato	km	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Asfalto	km	0,4	2,4	4,4	9,4	19,4
Altro	km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Distanza	km	1,0	3,0	5,0	10,0	20,0



INSERIRE DATI MACCHINA

			OP5: D	>> [X]	t/h	109,0
SELEZ. CANTIERE						
MO1	CARROBOTTE					OK
MO2	AUTOSCISTERNA	n	x		109,0	OK
MO3	VASCA BALIA (+ IRR. TAMBURO)	n	x		109,0	OK
MO4	CARRO SPANDILQUAME MONOASSE					OK
MO5	CARRO SPANDILQUAME TRIASSE					OK
MO6	COLTIVATORE OMBELICALE					OK
MO7	SPANDILQUAME SEMOVENTE	s	x		109,0	OK

VERIFICA: MACCHINE CHE PRECEDONO LA MO DI DISTRIBUZIONE HANNO UGUALE PRODUTTIVITA' (t/h) ?

TF





	TRASPORTO		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 + Spandiliquame (15 m ³)	
CST31+BAL70+SLQ15	<u>Autocisterna</u> (31 m ³)			
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)			
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 interrata</u>	TR + Irrig. rotolo	TR + Ombelicale	

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