

Valorizzazione dei reflui zootecnici a sostituzione della nutrizione minerale

Mais e sfide per la sostenibilità: mercati, micotossine e nutrizione azotata

Messaggio chiave: sostituzione possibile, ma contano logistica, finestre operative ed emissioni

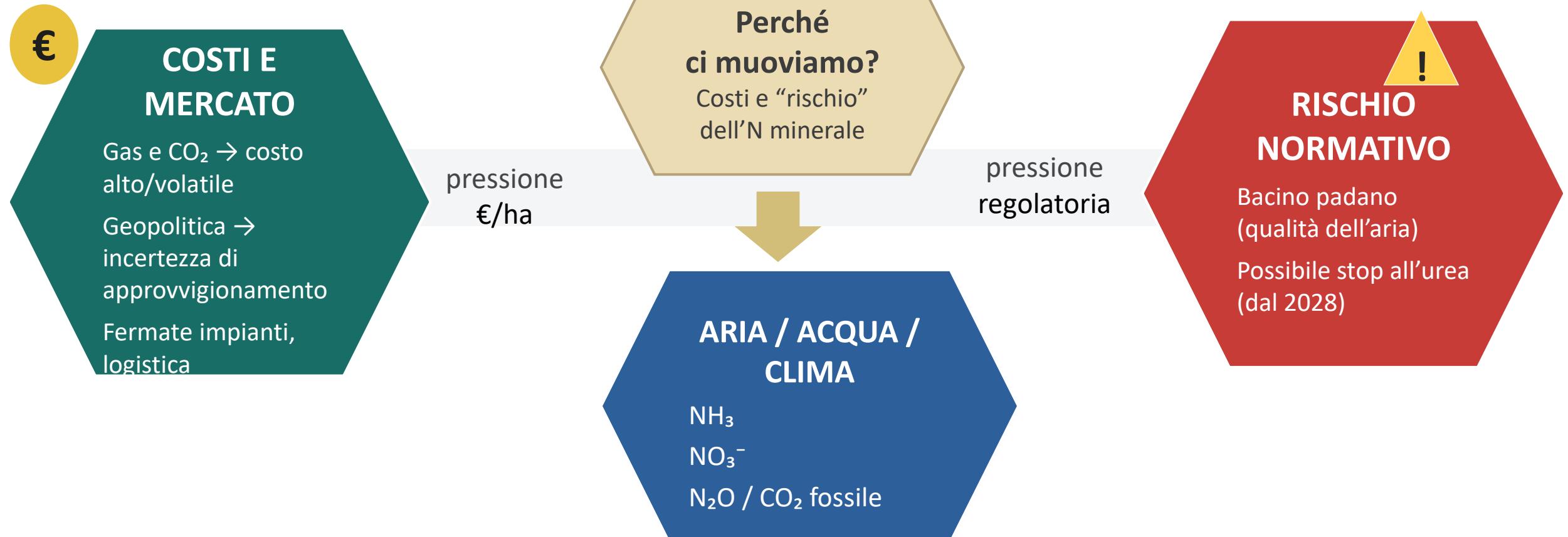
Marco Acutis, Unimi (retired)

Perché oggi: sostituzione dell'N minerale e vincoli

- Pressione su costi e volatilità del prezzo dei concimi minerali
- Piano nazionale di miglioramento della qualità dell'aria
- Vincoli ambientali: NH_3 (aria), NO_3^- (acqua- lisciviazione), N_2O (clima)
- Reflui: riciclo di N(e anche P-K) e valorizzazione territoriale
- Ma: volumi elevati, variabilità e logistica condizionano la riuscita

Perché sostituire almeno parte dell'N minerale: fattori chiave

- **L'azoto c'è:** la differenza la fa l'efficienza d'uso (N disponibile al momento giusto)
- **Le perdite** (soprattutto NH₃ nelle prime ore) possono annullare il vantaggio
- La sostituzione “1:1” richiede cantieri, accesso in campo e tecniche a bassa emissione



Liquame e digestato: cosa cambia

Liquame

- Variabilità elevata (diluizione, stoccaggio, dieta)
- Quota ammoniacale spesso alta → rischio NH_3 se superficiale
- Vincoli di trasporto (m^3/ha) e compattamento del terreno

Digestato (e frazioni)

- Maggiore “prontezza” dell’N (quota NH_4^+ spesso elevata)
- Separazione S/L: liquido più N- NH_4^+ ; solido più C e P
- Gestione più “da fertilizzante”, ma serve tecnica adeguata

Caratteristica	Compost	Letame (solido)	Liquame (tal quale)	Liquame (palabile)	Liquame (liquido)	Digestato (tal quale)	Digestato (palabile)	Digestato (liquido)
Stato fisico	Solido, stabile	Solido, fibroso	Liquido pompabile	Solido/semi-solido	Liquido scorrevole	Liquido/semi-liquido	Solido/semi-solido	Liquido scorrevole
Sostanza secca (%)	~40–60	~20–35	~4–10	~20–30	~1–4	~3–10	~20–30	~1–4
N totale	basso–medio	medio	medio	medio	basso–medio	medio	medio	basso–medio
TAN su N totale	molto bassa	bassa	alta	bassa–media	alta	alta (spesso elevata)	bassa–media	alta
Prontezza dell'N	lenta	lenta	rapida	lenta–media	rapida	rapida	lenta–media	molto rapida
So. Org. / ammenda	molto alto	alto	basso–medio	Medio-alto	basso	medio-basso	alto	basso
pH (tendenza)	neutro–subalcalino	~neutro	neutro–subalcalino	neutro–subalcalino	neutro–subalcalino	spesso subalcalino	subalcalino	subalcalino

Caratteristica	Compost	Letame (solido)	Liquame (tal quale)	Liquame (palabile)	Liquame (liquido)	Digestato (tal quale)	Digestato (palabile)	Digestato (liquido)
pH (tendenza)	neutro–subalcalino	~neutro	neutro–subalcalino	neutro–subalcalino	neutro–subalcalino	spesso subalcalino	subalcalino	subalcalino
Rischio NH₃ se superficiale	basso	medio	alto	medio	alto	alto	medio	alto
P (tendenza)	medio	medio–alto	medio	alto (si concentra)	basso	medio	alto (si concentra)	basso
K (tendenza)	medio	medio	alto	medio	alto	alto	medio	alto
Uso agronomico tipico	Ammendante/fondo, miglioramento suolo	Fondo, struttura, rilascio graduale	Fondo + (con tecnica) copertura	Fondo, copertuta iniezione fertirrigaz.	Copertura mirata (tecnica!)	Fondo + (con tecnica) copertura	Fondo, gestione P/SS	Copertura iniezione; talvolta fertirrigaz.

Azoto nei reflui: forme e implicazioni

- $N = N-NH_4^+$ (pronto effetto) + N organico (rilascio graduale)
- $N-NH_4^+$: aumenta l'efficacia fertilizzante ma è anche la principale sorgente di NH_3
- N organico: utile per scale medio-lunghe, meno per coperture rapide
- Implicazione: stimare N disponibile (non solo N totale)

Dal m³/ha ai kg N/ha: il passaggio che cambia tutto

- Gestire le dosi su: N totale e soprattutto TAN/N-NH₄⁺
- Definire coefficienti operativi di efficienza (tecnica + meteo + suolo)
- Obiettivo: massimizzare N utile al mais e minimizzare perdite
- Requisito minimo: analisi regolari + taratura della distribuzione

Dove si perde azoto: NH_3 , NO_3^- , N_2O

- NH_3 (ore–giorni): perdita rapida dopo applicazione superficiale (dipende da vento/temperatura)
- NO_3^- (settimane): rischio lisciviazione con anticipo eccessivo e piogge, soprattutto su suoli leggeri
- N_2O (giorni–settimane): rischio su suoli umidi/compatti e surplus di N disponibile
- Sostituire significa: stessa resa con minori perdite (non solo stessa dose)

Tecniche di distribuzione: impatto su efficienza ed emissioni

- Superficiale (piatto/irrigatore): semplice ma maggior rischio NH₃ e uniformità critica
- Rasoterra / bande (manichetta): riduzione intermedia di NH₃, buona per coperture
- Interramento / iniezione / strip-till: massima ritenzione di TAN → più N disponibile
- Trade-off: potenza/complessità e gestione del traffico in campo



Esempio: barra rasoterra (trailing shoe)

Minerale vs organico: il discriminante è la tecnica

Messaggio 1 (resa):

- Con tecniche a bassa emissione (iniezione/interramento), digestato/derivati → rese uguali a urea

Messaggio 2 (NH_3):

- Superficie = TAN perso → efficienza N ↓
- Iniezione/interramento = TAN conservato → N disponibile ↑

Applicazione superficiale

$\text{TAN} \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow\uparrow$

$\text{N utile al mais} \downarrow$

Iniezione / interramento

$\text{TAN} \rightarrow \text{NH}_3 \downarrow\downarrow$

$\text{N utile al mais} \uparrow$

Take-home: la tecnica converte TAN in nutrizione, non in emissione.

Dati (Riva 2016): fattori di emissione NH₃ e implicazione sulla resa

Fattore di emissione (EF) = N–NH₃ emesso / TAN applicato

Gestione / trattamento (sintesi)	EF NH ₃ (% TAN)	Messaggio tecnico
Digestato/derivati superficiali (media riportata)	38 ± 11	Perdite elevate → cala l'efficienza dell'N
Digestato iniettato (media riportata)	5.4 ± 5.4	Drastica riduzione NH ₃
Frazione liquida iniettata (media riportata)	9.75 ± 4.2	Iniezione rende l'uso “competitivo”
Urea (media riportata)	7.8 ± 5.2	Riferimento della pratica comune
Esempio puntuale: digestato superficiale (pre-semina)	30.4	Ordine di grandezza “alto”
Esempio puntuale: frazione liquida superficiale	46.3	Caso peggiore se non incorporato

- Interpretazione: in superficie si perde una quota rilevante di TAN; con iniezione gli EF diventano paragonabili all'urea
- Implica sulla resa: quando il TAN è conservato (iniezione), l'N torna disponibile e le rese risultano comparabili

Mais: strategia operativa (timing e frazionamento)

- Domanda di N elevata da V6 a pre-fioritura: serve N disponibile nel momento giusto
- Schema robusto: quota base pre-semina + quota in sarchiatura/side-dress (preferibilmente interrata)
- Irrigazione a goccia, subirrigazione.
- Obiettivo: massimizzare recupero N e ridurre surplus ($\text{NO}_3^-/\text{N}_2\text{O}$)

ReturN: ottimizzare la redistribuzione dell'N organico sul territorio

- Problema: aree in surplus zootecnico vs aree con domanda di nutrienti
- ReturN ottimizza flussi: kg N trasferiti, distanze, costi, CO₂ del trasporto
- Beneficio: riduzione acquisto di N minerale + migliore bilancio territorial
- Output: scenari e trade-off (costi ↔ emissioni ↔ capacità di utilizzazione agronomica)

Vincoli di entrata in campo: traffico, compattamento, uniformità

- Volumi elevati → mezzi pesanti → rischio compattamento (resa, infiltrazione, N₂O)
- Il vincolo reale è spesso la portanza: si spande “quando si può”
- Soluzioni: separare trasporto e distribuzione, ridurre peso in campo, sistemi ombelicali dove fattibile
- Uniformità e controllo dose: requisito per sostituzione “seria”

ReturN: Ottimizzare lo spostamento di N organico tra aziende (surplus → deficit)

- Problema: distretti zootecnici = surplus di N (vincolo Direttiva Nitrati) e aree maidicole = deficit di N
- Obiettivo pratico: valorizzare liquame/digestato riducendo l'uso di N minerale, ma "senza impattare troppo" con trasporto e emissioni emissive
- Idea chiave: la "convenienza" del refluo dipende dal compromesso tra (i) costi €/kgN e (ii) emissioni (CO₂EQ) di trasporto vs produzione concimi

Come funziona

- Input minimi:
 - Bilanci di N (surplus/deficit) per azienda o per unità territoriale + distanze relative
 - Parametri di impatto: costo trasporto (€/km), emissioni trasporto (kgCO₂/km), costo concime, emissioni produzione concime
- Ottimizzazione multi-obiettivo: un peso w bilancia costi vs emissioni ($w=1$ solo costi; $w=0$ solo emissioni)
- Output: flussi ottimali (kg N spostati), N minerale evitato, costi totali e CO₂ totali (scenario vs baseline)

$$f_{org} = [C_{km} \cdot w + E_{km} \cdot (1 - w)] \cdot \text{distanza}$$

$$f_{min} = C_a \cdot w + E_p \cdot (1 - w)$$

$$d^* = \frac{f_{min}}{C_{km} \cdot w + E_{km} \cdot (1 - w)}$$

• **distanza**: km del trasporto

• C_{km} : **costo economico per km** per portare **1 kg di N** (€/km per kg N). Dipende da: costo trasporto/spandimento, **concentrazione di N** (se "diluito", più m³ per 1 kg N)

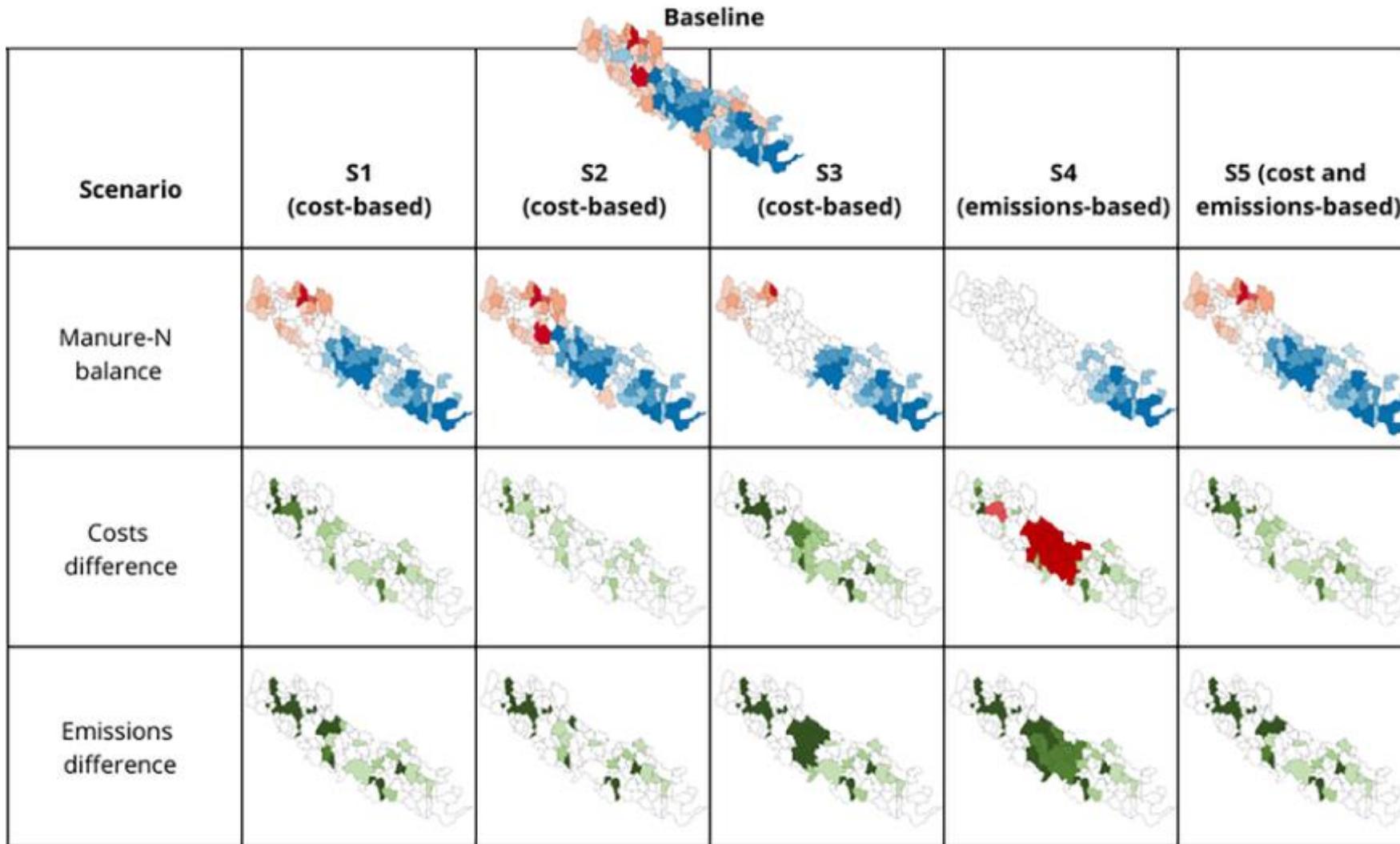
• E_{km} : **emissioni per km** per portare **1 kg di N** (kg CO₂/km per kg N) se basso più CO₂ per km.

• w (tra 0 e 1): **peso** costi/emissioni: $w=1$ **solo i costi** (€) : $w=1$ **solo emissione**

• d^* è **il punto di breakeven**

Distanza “soglia”: perché non è un numero fisso

- Oltre una certa distanza, il refluo perde competitività (più costo e/o CO₂ per kg N trasportato)
- La soglia dipende dai parametri (e può cambiare molto):
 - peso w (priorità: costi vs emissioni)
 - prezzo ed emissioni “embedded” dei fertilizzanti minerali (es. urea)
 - costo/km e emissioni/km del cantiere (logistica, mezzi, velocità, viaggi)
 - concentrazione di N del refluo (diluizione → più volumi per stesso kgN)
- Le soglie di trade-off in scenari diversi e ipotesi diverse spaziano da ~5.7 km a ~94 km



Baseline e S1–S5

Baseline = situazione attuale (prima dell'ottimizzazione ReturN).
S1–S5 = scenari con parametri diversi.

Legenda colori (riga 1)

Bilancio N reflui ($t N \text{ anno}^{-1}$)

- Blu = deficit (aree “riceventi”)
 - Rosso = surplus (aree “sorgenti”)
- Bianco \approx bilancio vicino a zero

- deficit (più forte)
- deficit (moderato)
- surplus (moderato)
- surplus (più forte)

Legenda colori (righe 2–3)

Differenza vs baseline (%)

- Verde = riduzione / risparmio
 - Rosso = aumento
- Riga 2: costi (€)
Riga 3: emissioni (kg CO₂)

- riduzione (migliore)
- riduzione (piccola)
- aumento (piccolo)
- aumento (peggiore)

Scenari S1–S5

S1–S3: ottimizzazione basata SOLO sui costi ($w = 1$). Cambia il prezzo dell’N minerale acquistato (Mi, €/kg N).

S4: ottimizzazione basata SOLO sulle emissioni ($w \approx 0$) → minimizza CO₂ associata ai flussi, MT + Cover

S5: compromesso costi + emissioni ($0 < w < 1$) MT + Cover

Differenza tra S1, S2 e S3 (stesso modello, diverso prezzo dell’N minerale)

S1: prezzo medio (2019–2024, escludendo periodi anomali) → = 0,331 €/kg N.

S2: prezzo minimo → = 0,185 €/kg N.

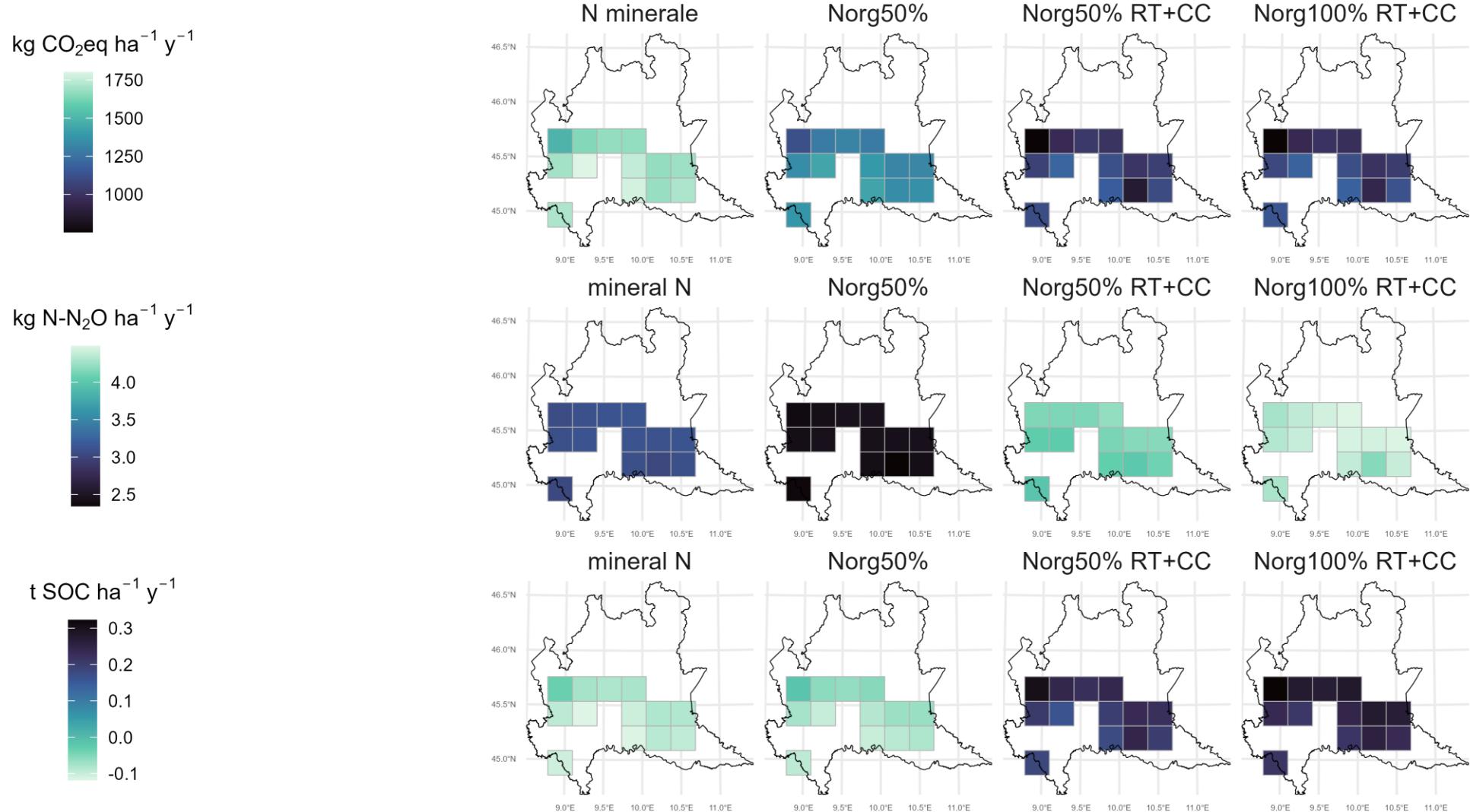
S3: prezzo massimo → = 0,923 €/kg N.

Effetto atteso: più è caro l’N minerale, più conviene (economic.) spostare N organico anche a distanze maggiori.

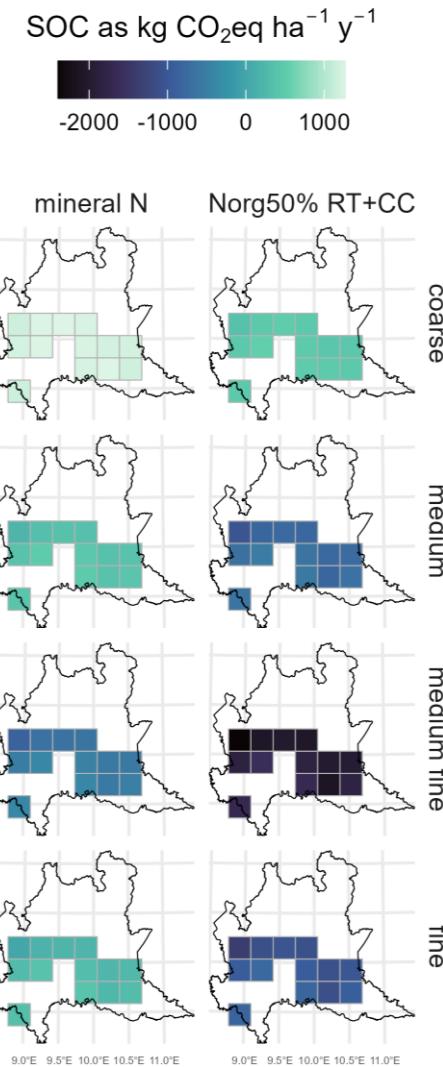
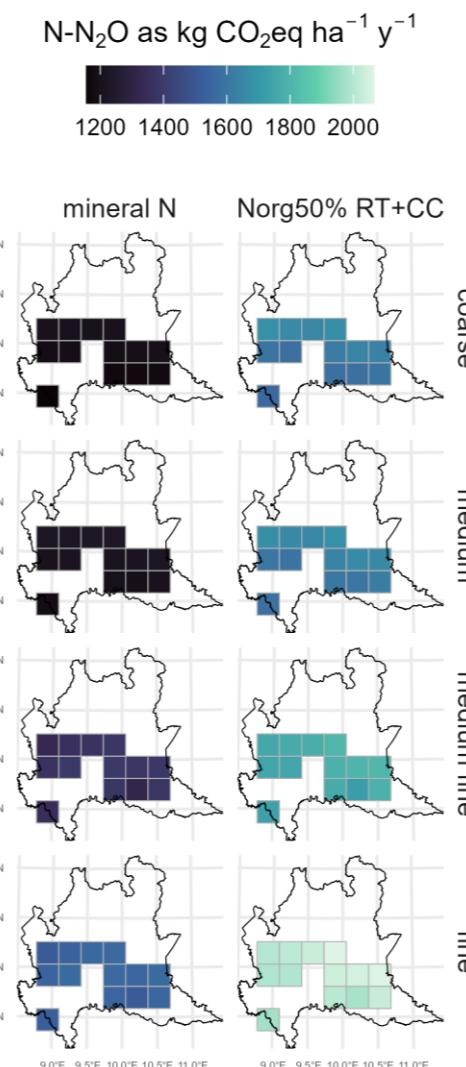
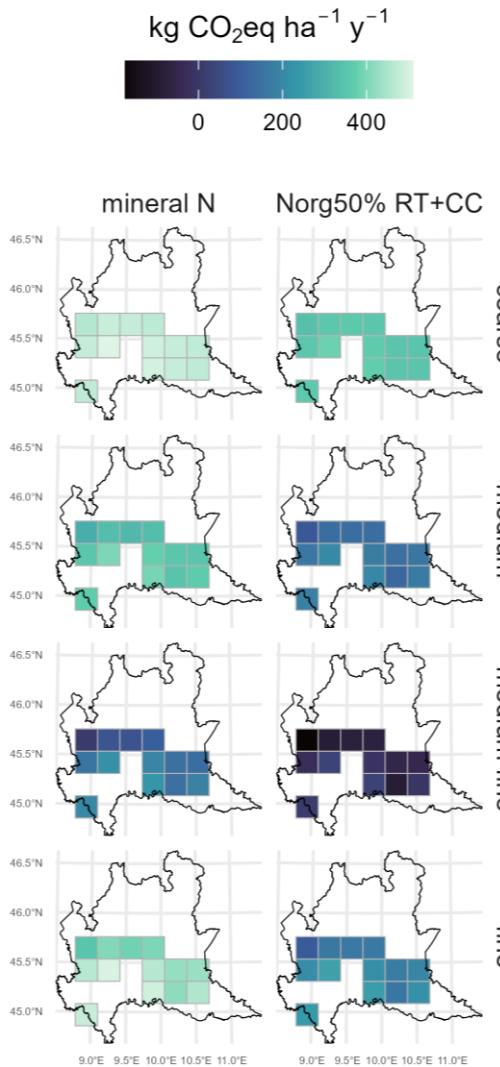
tutti i risultati sono riportati come variazione % rispetto alla baseline, definita come la situazione PRIMA della redistribuzione ottimizzata dei flussi.

Quindi: baseline = allocazione/uso attuale; scenari = cosa cambia applicando ReturN con obiettivi e parametri diversi.

Effetti della sostituzione su emissioni e SOC



Effetti della sostituzione su emissioni e SOC - per differenti suoli



Misuro e pianifico

- Analisi: N totale + TAN/ NH_4^+ (+ SS se serve)
- Dosi in kg N/ha (non m^3/ha)
- Bilanci P e K nel medio periodo

Applico bene

- Timing: quota base + side-dress
- Tecniche low emission: rasoterra/iniezione
- Cantiere: meno peso in campo, più finestre utili

Conclusioni

- Liquame e digestato possono sostituire gran parte dell'N minerale nel mais
- La condizione è un triangolo: dose su N disponibile + timing + tecnica/cantiere
- La sostenibilità si gioca su: efficienza N, NH₃ (aria), NO₃⁻ (acque) e **gestione territoriale**

Grazie