RELAZIONE FINALE DEL PROGETTO

Strategie per la riduzione delle emissioni di ammoniaca dal letame (STREAL2)

Accordo di collaborazione di cui alla D.D. 993/A1706B del 10/11/2025

Coordinatore del Progetto: Dott.ssa Monica Bassanino

Settore Produzioni Agrarie e Zootecniche - Regione Piemonte

Referente scientifico del progetto: Prof. Elio Dinuccio

Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari –Università di Torino

1 Giugno 2025 - 31 Maggio 2026


REGIONE
PIEMONTE


UNIVERSITAS STUDII TAURINENSIS
1404
DISAFA
Dipartimento di Scienze
Agrarie, Forestali e Alimentari

1. Contesto scientifico e rilevanza ambientale della gestione del letame....1
1.1. Emissioni di ammoniaca nel settore agricolo e zootecnico....1
2. Processi di formazione dell'ammoniaca e strategie di mitigazione....2
2.1. Classificazione e meccanismi di azione degli additivi....2
2.1.1. Additivi chimici....3
2.1.2. Additivi fisici....3
2.1.3. Additivi biologico-enzimatici....4
2.2. Stato delle conoscenze....4
3. Obiettivi del progetto....5
4. Materiali e metodi....5
4.1. Selezione delle aziende e disegno sperimentale....5
4.2. Prove sperimentali in scala pilota....6
4.3. Caratterizzazione fisico-chimica del letame....8
4.3.1. Analisi fisiche....8
4.3.2. Analisi chimiche su campioni freschi....8
4.3.3. Analisi chimiche su campioni secchi....9
4.4. Monitoraggio delle emissioni di ammoniaca....9
4.5. Monitoraggio della temperatura....10
4.6. Elaborazione dei dati e analisi statistica....10
5. Risultati....11
5.1. Caratterizzazione chimico-fisica del letame....11
5.2. Azienda San Martino – Prova Invernale....12
5.3. Azienda F.lli Di Francia – Prova Invernale....15
5.4. Azienda Garelli – Prova Invernale....20
5.5. Azienda San Martino – Prova Estiva....24
5.6. Azienda F.lli Di Francia – Prova Estiva....27
7. Conclusioni relative all'attività sperimentale....32
8. Disseminazione dei risultati....34
8.1. Divulgazione scientifica....34
8.2. Attività di formazione tecnica in agricoltura....34
8.3. Prodotti per la divulgazione....35
9. Bibliografia....36
ALLEGATO A. Articolo tecnico....37
ALLEGATO B. Opuscolo....38
ALLEGATO C. Contenuti delle video-pillole....39

1. Contesto scientifico e rilevanza ambientale della gestione del letame

La gestione del letame rappresenta una sfida cruciale per la sostenibilità ambientale dei sistemi agro-zootecnici. In particolare, durante lo stoccaggio si verificano trasformazioni fisiche, chimiche e biologiche che determinano perdite di azoto, principalmente sotto forma di ammoniaca (NH_3) (Amon et al., 2006; Aguerre et al., 2012). Tali perdite contribuiscono al peggioramento della qualità dell'aria attraverso la formazione di particolato fine secondario (PM2.5), con effetti negativi sulla salute umana. Inoltre, la dispersione dell'azoto ammoniacale nell'ambiente può contribuire alla formazione indiretta di protossido di azoto (N_2O), potente gas a effetto serra, attraverso i processi di trasformazione dell'azoto nell'ambiente (Cao et al., 2019).

Oltre agli impatti atmosferici, la perdita di nutrienti dagli effluenti di allevamento, in particolare di azoto e fosforo, può favorire fenomeni di eutrofizzazione delle acque superficiali e sotterranee, alterando gli equilibri ecologici e compromettendo la qualità delle risorse idriche.

Parallelamente, tali perdite riducono il valore agronomico degli effluenti e l'efficienza del loro impiego come fertilizzanti organici. Questo aspetto è particolarmente rilevante poiché gli effluenti zootecnici rappresentano una risorsa strategica per la sostenibilità dei sistemi agro-zootecnici: il loro corretto impiego consente infatti il recupero dei nutrienti e la chiusura dei cicli aziendali, contribuendo a ridurre la dipendenza dai fertilizzanti minerali di sintesi.

La conservazione dell'azoto negli effluenti assume inoltre un'importanza crescente anche nelle strategie di risparmio energetico e di mitigazione dei cambiamenti climatici. La produzione industriale dei fertilizzanti azotati è infatti caratterizzata da elevati consumi energetici e da significative emissioni di CO_2 fossile. Pertanto, una gestione efficiente degli effluenti zootecnici e la riduzione delle perdite di azoto possono contribuire sia alla mitigazione degli impatti ambientali sia a una maggiore sostenibilità dei sistemi agricoli (Lee & Kim, 2024).

1.1. Emissioni di ammoniaca nel settore agricolo e zootecnico

Le emissioni di ammoniaca costituiscono una delle principali pressioni ambientali associate alle attività agricole e zootecniche. Secondo l'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera (ISPRA, 2025), nel 2023 il settore agricolo ha contribuito per il 91,4% alle emissioni nazionali di NH_3, pari a 349,23 kt, confermandosi la principale fonte emissiva a

livello nazionale. Le emissioni derivano principalmente dalla gestione degli allevamenti, includendo sia le fasi di stabulazione sia quelle di stoccaggio delle deiezioni, oltre all'utilizzo di fertilizzanti organici e minerali in campo. In particolare, le attività legate alla gestione degli allevamenti rappresentano circa il 54% del totale delle emissioni agricole di ammoniaca, mentre lo spandimento degli effluenti contribuisce per circa il 15%. A livello regionale, il Piemonte presenta una forte incidenza del comparto zootecnico sulle emissioni di ammoniaca. Secondo i dati dell'Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera (IREA), in Piemonte, circa l'85% delle emissioni agricole di NH_3 è riconducibile alle deiezioni animali e alla gestione del letame, includendo le fasi di stoccaggio e utilizzo agronomico (ARPA, 2021).

2. Processi di formazione dell'ammoniaca e strategie di mitigazione

Le emissioni di ammoniaca sono il risultato dell'interazione tra processi chimici, fisici e biologici che regolano le trasformazioni dell'azoto e il trasferimento di massa durante le diverse fasi di gestione degli effluenti zootecnici. L'equilibrio tra ammonio (NH_4^+) e NH_3, determinato principalmente da pH e temperatura, rappresenta il principale fattore chimico che controlla il potenziale di volatilizzazione dell'azoto ammoniacale, mentre la struttura fisica del materiale, il contenuto di umidità, la porosità e la disponibilità di ossigeno regolano i processi di diffusione dei gas e l'attività microbica responsabile delle trasformazioni dei composti azotati. Sulla base di queste conoscenze, sono state proposte diverse strategie di mitigazione, comprendenti interventi strutturali, gestionali e tecnologici. Tra queste, gli additivi chimici, biologico-enzimatici e fisici rappresentano una soluzione di particolare interesse, poiché intervengono direttamente sui processi responsabili della formazione e della volatilizzazione dell'azoto ammoniacale (Berg, 2012).

2.1. Classificazione e meccanismi di azione degli additivi

Gli additivi utilizzabili per la mitigazione delle emissioni possono essere suddivisi in tre principali categorie (Tabella 1).

Tabella 1. Principali categorie di additivi e relativo meccanismo d'azione (Cao et al, 2019).

Categoria	Tipologia di additivi	Meccanismo d'azione
Additivi chimici	Sali di PO_4^{3-} e Mg^{2+}, superfosfato, gesso, KH_2PO_4, H_3PO_4, $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $CaCl_2$, H_2SO_4, $FeCl_3$, $MgCl_2$, $MgSO_4$, zolfo (S), $KHSO_4$, acido citrico e altri composti acidificanti	Promuovono reazioni chimiche che influenzano i processi di trasformazione dell'azoto e riducono la volatilizzazione ammoniacale
Additivi fisici	Biochar, zeolite, bentonite, perlite espansa, vermiculite, pomice, sabbia, argilla, carbone attivo, ceneri da biomassa	Agiscono mediante adsorbimento dei composti ammoniacali o modificando le proprietà fisiche del letame
Additivi biologico-enzimatici	Batteri nitrificanti e denitrificanti, microrganismi decompositori, consorzi microbici commerciali	Influenzano i processi microbiologici di trasformazione dell'azoto

2.1.1. Additivi chimici

Gli additivi chimici agiscono principalmente attraverso la modifica delle condizioni chimico-fisiche del substrato, in particolare del pH, influenzando i processi di trasformazione dell'azoto e riducendo la volatilizzazione dell'ammoniaca.

Lo zolfo elementare in polvere (classe tossicologica IV), comunemente utilizzato anche come fungicida, rappresenta un additivo chimico in grado di ridurre le emissioni di ammoniaca attraverso processi di acidificazione del substrato (Petit et al., 2010).

Lo zolfo viene ossidato biologicamente a solfato secondo il seguente schema semplificato:

$$S^0 + 1/2\ O_2 + CO_2 + 2H_2O \rightleftarrows CH_2O + SO_4^{2-} + 2H^+$$

La produzione di ioni H^+ determina l'acidificazione del substrato, contribuendo alla riduzione delle emissioni di ammoniaca (Cao et al., 2019).

2.1.2. Additivi fisici

Gli additivi adsorbenti comprendono materiali di origine:

- vulcanica (zeoliti, farina di basalto);
- organica (biochar).

Le principali proprietà includono:

- elevata microporosità;

- capacità di adsorbimento e assorbimento;
- capacità di scambio cationico.

In ambito zootecnico, questi materiali trovano applicazione in diversi contesti, sia come additivi nei mangimi sia come ammendanti per il trattamento dei reflui, contribuendo in quest'ultimo caso alla riduzione delle emissioni di ammoniaca. Il loro meccanismo principale consiste nella ritenzione fisica dell'ammoniaca e nella riduzione degli scambi gassosi tra substrato e atmosfera (Cao et al., 2019; Guarino et al., 2006; Petit et al., 2010).

2.1.3. Additivi biologico-enzimatici

Gli additivi biologico-enzimatici agiscono attraverso la modulazione dei processi microbiologici ed enzimatici coinvolti nel ciclo dell'azoto.

In particolare:

- i microrganismi nitrificanti favoriscono la trasformazione dell'azoto ammoniacale in forme ossidate meno soggette a volatilizzazione, mentre quelli denitrificanti intervengono nella successiva riduzione dei nitrati, modificando le trasformazioni dell'azoto all'interno del substrato;
- i lieviti e i funghi contribuiscono alla stabilizzazione della frazione organica;
- gli inibitori dell'ureasi rallentano la degradazione dell'urea, riducendo la formazione di azoto ammoniacale e la successiva volatilizzazione dell'ammoniaca (Cao et al., 2019; Sun et al., 2014).

2.2. Stato delle conoscenze

Numerosi studi hanno valutato l'impiego di additivi come strategie di mitigazione per ridurre le emissioni e migliorare le caratteristiche del letame durante lo stoccaggio (McCrory & Hobbs, 2001; Duong et al., 2021), con risultati spesso contrastanti. Sebbene i meccanismi di azione descritti in letteratura suggeriscono una potenziale riduzione delle perdite di azoto e delle emissioni gassose, i risultati sperimentali disponibili evidenziano un'efficacia variabile, fortemente dipendente dalle condizioni operative, dalle modalità di applicazione e dalle caratteristiche del materiale trattato. In diversi casi non sono state osservate riduzioni consistenti delle emissioni di ammoniaca e, in alcune condizioni, sono emersi effetti collaterali sulle emissioni di altri gas, tra cui l'anidride carbonica (CO_2), a conferma della complessità dei processi biochimici che regolano la degradazione della sostanza organica

durante lo stoccaggio del letame (Holly & Larson, 2017). La maggior parte degli studi disponibili è stata inoltre condotta in laboratorio o in condizioni sperimentali controllate, mentre risultano ancora limitate le evidenze derivanti da sperimentazioni svolte in aziende rappresentative. Ne consegue la necessità di sviluppare studi in grado di valutare l'efficacia delle strategie di mitigazione nelle diverse realtà produttive, tenendo conto della variabilità dei sistemi di allevamento e delle pratiche gestionali.

3. Obiettivi del progetto

L'obiettivo generale del progetto STREAL2 è stato quello di valutare, in condizioni operative rappresentative, l'efficacia di differenti tipologie di additivi nella conservazione dell'azoto e nella riduzione delle emissioni di ammoniaca durante lo stoccaggio del letame bovino.
In particolare, il progetto si è proposto di:

- ampliare e consolidare le conoscenze acquisite nel precedente progetto STREAL, estendendo la sperimentazione a letami provenienti da differenti realtà aziendali e valutando l'efficacia degli additivi in diverse condizioni ambientali e gestionali;
- quantificare le emissioni di ammoniaca durante lo stoccaggio del letame mediante prove sperimentali in scala pilota condotte presso allevamenti rappresentativi del territorio piemontese;
- valutare l'influenza delle condizioni ambientali, in particolare la stagionalità (periodi estivo e invernale), sulle dinamiche emissive e sull'efficacia degli additivi;
- approfondire l'interazione tra le caratteristiche chimico-fisiche del letame, le pratiche gestionali aziendali e i processi emissivi;
- fornire dati scientificamente validati attraverso monitoraggi sistematici, elaborazione dei dati e analisi statistiche delle misurazioni;
- disseminare i risultati del progetto attraverso linee guida, pubblicazioni scientifiche e attività di divulgazione rivolte ad agricoltori, tecnici e altri stakeholder.

4. Materiali e metodi

4.1. Selezione delle aziende e disegno sperimentale

Una fase preliminare del progetto è stata dedicata all'individuazione delle aziende zootecniche che avrebbero ospitato la sperimentazione e fornito il letame bovino utilizzato nelle prove. La ricerca delle aziende è stata effettuata con il supporto delle principali

Associazioni di categoria del territorio piemontese. Il personale del DISAFA ha predisposto una specifica scheda di selezione, definendo requisiti relativi alla tipologia e alla dimensione dell'allevamento, al sistema di stabulazione, alla lettiera, alla frequenza e alle modalità di pulizia dei recinti e alla gestione del letame. L'obiettivo era ridurre, per quanto possibile, la variabilità dovuta a fattori aziendali non controllabili e assicurare una base sperimentale sufficientemente omogenea per il confronto tra i trattamenti. Le aziende candidate dovevano essere prevalentemente orientate all'allevamento di bovini da carne, utilizzare lettiera di paglia e rendere disponibile il letame in corrispondenza delle operazioni programmate di pulizia dei recinti. In Tabella 2 sono riportate le aziende zootecniche selezionate per la sperimentazione, localizzazione e principali caratteristiche del sistema di allevamento.

Tabella 2. Aziende zootecniche coinvolte nella sperimentazione e principali caratteristiche dei sistemi di allevamento e di gestione del letame.

Azienda	Località	Caratteristiche principali
Società Agricola San Martino S.S.	Orbassano (TO)	Allevamento di vitelloni da carne di razza Piemontese, gestiti in recinti su lettiera di paglia. Rimozione del letame con pala meccanica
Società Agricola F.lli Di Francia S.S.	Frossasco (TO)	Allevamento di bovini da carne di razza Limousine in recinti multipli con lettiera di paglia. Rimozione del letame con pala meccanica
Società Agricola Garelli S.S.	Mondovì (CN)	Allevamento di bovini di razza Piemontese con linea vacca-vitello, ingrasso e produzione di latte, in recinti con lettiera di paglia. Rimozione del letame con pala meccanica

Il disegno sperimentale ha previsto la valutazione di quattro trattamenti (Controllo, SOP, BiStar e Zolfo), ciascuno realizzato in tre repliche per azienda e per campagna stagionale. In particolare, le attività sperimentali sono state realizzate in due distinti periodi dell'anno, rappresentativi delle principali condizioni climatiche di interesse:

- campagna estiva;
- campagna invernale.

Per ciascuna azienda e per ciascuna campagna stagionale, il letame è stato sottoposto ai trattamenti sperimentali previsti dal protocollo di prova e successivamente monitorato durante il periodo di stoccaggio.

4.2. Prove sperimentali in scala pilota

Le prove sono state condotte in condizioni controllate mediante l'utilizzo di contenitori sperimentali forati (volume 0,65 m³), posizionati all'aperto su superfici idonee allo stoccaggio (Fig. 1).



Fig. 1. Contenitori sperimentali utilizzati nelle prove di stoccaggio del letame

In ciascuna azienda sono stati allestiti 12 contenitori, ciascuno riempito con circa 250–300 kg di letame bovino (Tabella 2).

Tabella 2. Trattamenti sperimentali impiegati nella prova in scala pilota e relative dosi di applicazione. Le dosi riportate derivano dalle schede tecniche dei produttori e sono state adattate alla scala sperimentale utilizzata.

Trattamento	Categoria	Dose di applicazione	Additivo per unità
Controllo	—	—	0
SOP EASY	Fisico (adsorbente)	56 g/m²	0,11 kg
BISTAR/Complex	Biologico-enzimatico	56 g/m²	0,11 kg
Kumulus-Tecno Zolfo (S 80%)	Chimico	1 kg S/t	0,28 kg

Gli additivi sono stati applicati durante la fase di riempimento dei contenitori e incorporati progressivamente per strati, al fine di garantire una distribuzione omogenea all'interno della massa.

4.3. Caratterizzazione fisico-chimica del letame

4.3.1. Analisi fisiche

Le analisi fisiche sono state eseguite presso il laboratorio interno "Biomass & Waste Management" del Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari su campioni di letame prelevati all'inizio e al termine della prova sperimentale.

Sono stati determinati i seguenti parametri:

- sostanza secca (SS);
- contenuto in ceneri (residuo minerale).

Le determinazioni sono state effettuate su:

- un campione rappresentativo del letame tal quale prelevato prima dell'avvio della sperimentazione per ciascuna azienda;
- tutti i campioni relativi alle unità sperimentali a fine prova, comprendenti il controllo e i tre trattamenti, ciascuno in triplicato.

4.3.2. Analisi chimiche su campioni freschi

Campioni di letame fresco (circa 150 g) sono stati prelevati all'inizio e al termine della prova sperimentale.

Per ciascuna azienda sono stati analizzati complessivamente 13 campioni: 3 repliche controllo, 3 SOP, 3 BiStar, 3 Zolfo e 1 campione rappresentativo del letame tal quale prelevato prima dell'avvio della sperimentazione .

Le analisi sono state effettuate presso il Laboratorio Agrochimico Regionale (LAR), Direzione Agricoltura e Cibo – Settore Fitosanitario e Servizi Tecnico-Scientifici.
Su tali campioni sono stati determinati:

- azoto totale (N);
- azoto ammoniacale (NH_4^+-N).

Le determinazioni sono state eseguite mediante metodo di Kjeldahl, secondo la metodologia DIVAPRA, IPLA, ARPA (1998).

4.3.3. Analisi chimiche su campioni secchi

Campioni di letame essiccato e triturato (circa 300 g) sono stati analizzati presso il Laboratorio Agrochimico Regionale (LAR).

Le analisi sono state condotte su:

- campioni iniziali per ciascuna azienda;
- campioni di controllo a fine prova per ciascuna azienda.

Sono stati determinati i seguenti parametri:

- pH;
- carbonio organico (C);
- fosforo (P);
- potassio (K).

4.4. Monitoraggio delle emissioni di ammoniaca

Le emissioni di ammoniaca sono state determinate mediante un sistema di campionamento a camera ventilata (funnel system) (Fig. 2a) accoppiato a un analizzatore di gas ad alta risoluzione (ETG 8900 QEPAS, ETG Risorse) (Fig. 2b), integrato con un sistema di campionamento multipunto gestito tramite software ETG Guardian, che ha consentito il monitoraggio simultaneo dei diversi trattamenti.

Il monitoraggio è stato effettuato per l'intera durata della prova sperimentale (circa 30 giorni) o fino al raggiungimento di flussi emissivi trascurabili. I campionamenti sono stati eseguiti quotidianamente durante la prima settimana e successivamente con frequenza ridotta a due–tre misure settimanali nelle fasi successive. Ogni misura ha avuto una durata di 10 minuti per punto di campionamento.



Fig. 2. Apparato sperimentale per la misura delle emissioni di NH_3: a) installazione delle camere dinamiche di campionamento (funnel system) sulle unità sperimentali; b) analizzatore di gas ad alta risoluzione (ETG 8900 QEPAS) collegato al sistema di campionamento multipunto e di acquisizione automatica dei dati.

4.5. Monitoraggio della temperatura

Ogni contenitore sperimentale è stato equipaggiato con una termocoppia inserita nella massa di letame e con un sensore per la misura della temperatura ambientale esterna. I dati relativi alla temperatura interna del letame e alla temperatura esterna sono stati registrati in continuo mediante datalogger (Onset® Hobo U12).

4.6. Elaborazione dei dati e analisi statistica

I dati sperimentali sono stati organizzati ed elaborati mediante Microsoft Excel 365. In particolare, sono stati calcolati i flussi emissivi di ammoniaca e le emissioni cumulate nel tempo per ciascuna unità sperimentale, distinguendo per azienda e per campagna stagionale. Excel è stato inoltre utilizzato per la costruzione dei grafici relativi all'andamento delle temperature. Le analisi statistiche sono state eseguite mediante il software R (versione 4.5.2) e hanno incluso l'analisi della varianza (ANOVA a una via) per la valutazione delle differenze tra i trattamenti in termini di emissioni di ammoniaca. I risultati sono stati ulteriormente rappresentati mediante boxplot per la visualizzazione della distribuzione dei dati.

5. Risultati

5.1. Caratterizzazione chimico-fisica del letame

Le caratteristiche chimico-fisiche del letame all'inizio e al termine delle prove sperimentali sono riportate rispettivamente nelle Tabelle 3 e 4. All'avvio delle prove il contenuto di sostanza secca (SS) variava tra il 23,3% e il 42,7%, corrispondente a un'umidità compresa tra il 57,3% e il 76,7%. Il pH iniziale risultava sempre alcalino, con valori compresi tra 8,22 e 9,15. Il contenuto di azoto totale variava da 0,706 a 1,449% sul tal quale, mentre l'azoto ammoniacale ($N\text{-}NH_4^+$) era generalmente inferiore allo 0,10% sul tal quale (t.q.), ad eccezione del campione San Martino nella prova invernale (0,160% t.q.). Il contenuto di carbonio totale era compreso tra 42,48 e 47,21% sulla sostanza secca, mentre il contenuto di fosforo e potassio variava rispettivamente tra 0,590 e 0,738% ss e tra 5,204 e 6,277% ss nei campioni analizzati.

Tabella 3. Caratteristiche chimico-fisiche iniziali del letame

Campione	**SS (%)**	**SV (%ss)**	**pH**	**N totale (%tq)**	**$N\text{-}NH_4^+$ (%tq)**	**C totale (%ss)**	**P totale (%ss)**	**K totale (%ss)**
F.lli Di Francia - Estate	42.7	80.76	9.15	1.449	0.087	45.82	0.674	5.480
San Martino – Estate	23.3	85.64	8.77	0.706	0.050	47.21	0.738	6.277
F.lli Di Francia - Inverno	26.5	80.95	8.22	0.810	0.041	43.57	0.590	5.513
San Martino - Inverno	23,7	86.91	8.35	0.788	0.160	—	—	—
Garelli – Inverno	33.6	77.45	8.95	1.124	0.003	42.48	0.637	5.204

Al termine dello stoccaggio, l'aumento della sostanza secca è risultato particolarmente marcato nelle prove estive, coerentemente con una maggiore evaporazione dell'acqua e con temperature interne più elevate, raggiungendo il 68,66% nel campione F.lli Di Francia e il 49,8% nel campione San Martino. Nelle prove invernali, invece, la sostanza secca ha

mostrato variazioni più contenute, attestandosi al 23,28% nel campione F.lli Di Francia e al 30,79% nel campione Garelli. Il pH finale è rimasto alcalino in tutte le matrici, con valori compresi tra 8,39 e 9,30, mentre la concentrazione di azoto ammoniacale è diminuita rispetto ai valori iniziali, raggiungendo valori compresi tra 0,016 e 0,038% sul tal quale. Tale riduzione può essere attribuita all'azione combinata della volatilizzazione dell'NH_3, dell'immobilizzazione microbica, dei processi di nitrificazione nelle zone più ossigenate della massa e delle variazioni di concentrazione conseguenti alla perdita di acqua e di sostanza organica. Il contenuto di carbonio totale ha mostrato variazioni limitate, mantenendosi generalmente intorno al 43–44% sulla sostanza secca, mentre il contenuto di fosforo e potassio è risultato generalmente più elevato rispetto ai valori iniziali, raggiungendo rispettivamente valori fino a 1,045% ss e 9,471% ss.

Tabella 4. Caratteristiche chimico-fisiche del letame al termine della prova

Campione	**SS (%)**	**SV (%ss)**	**pH**	**N totale (%tq)**	**N-NH_4^+ (%tq)**	**C totale (%ss)**	**P totale (%ss)**	**K totale (%ss)**
F.lli Di Francia - Estate	68.6	81.52	9.30	1.976	0.038	43.89	0.802	7.092
San Martino – Estate	49.8	73.20	9.03	1.332	0.030	43.20	1.045	9.471
F.lli Di Francia - Inverno	23.2	75.21	8.90	0.813	0.032	43.03	0.632	7.323
San Martino - Inverno	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Garelli – Inverno	30.7	72.82	8.39	0.933	0.016	—	—	—

5.2. Azienda San Martino – Prova Invernale

La prova invernale condotta presso l'azienda agricola San Martino (Orbassano, TO) ha avuto una durata complessiva di 9 giorni. Nel corso del monitoraggio, i flussi medi di ammoniaca hanno mostrato un andamento decrescente nel tempo in tutti i trattamenti (Fig. 3). I valori

iniziali risultavano elevati e confrontabili tra i trattamenti, con flussi compresi tra circa 70 e 90 mg/h m². Nelle prime 24 ore è stata osservata una marcata riduzione delle emissioni, seguita da un ulteriore decremento progressivo nei giorni successivi. Nella fase finale del periodo di osservazione, i flussi si sono stabilizzati su valori molto bassi (< 10 mg/h m²) in tutti i trattamenti, con livelli leggermente inferiori nei trattamenti SOP, BiStar e zolfo rispetto al controllo.

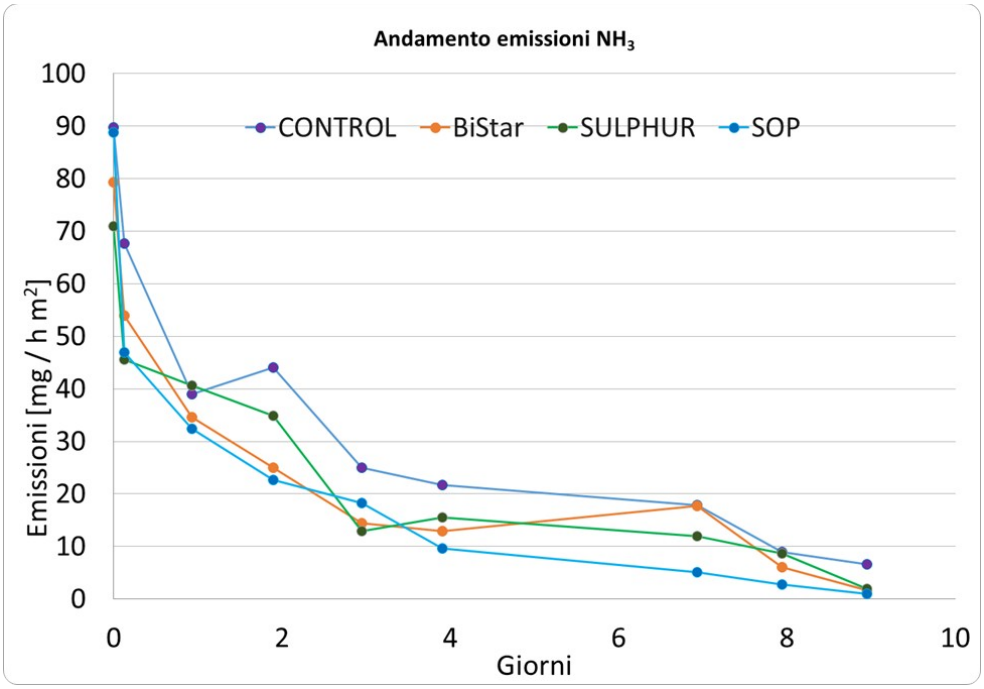


Fig. 3. Andamento temporale dei flussi emissivi di ammoniaca.

Rispetto al controllo, le emissioni cumulative medie di NH_3 (g/m^2) sono risultate inferiori del 27% con BiStar, del 25% con zolfo e del 44% con SOP (Fig. 4). Le differenze non sono tuttavia risultate statisticamente significative, a causa dell'elevata variabilità tra le repliche.

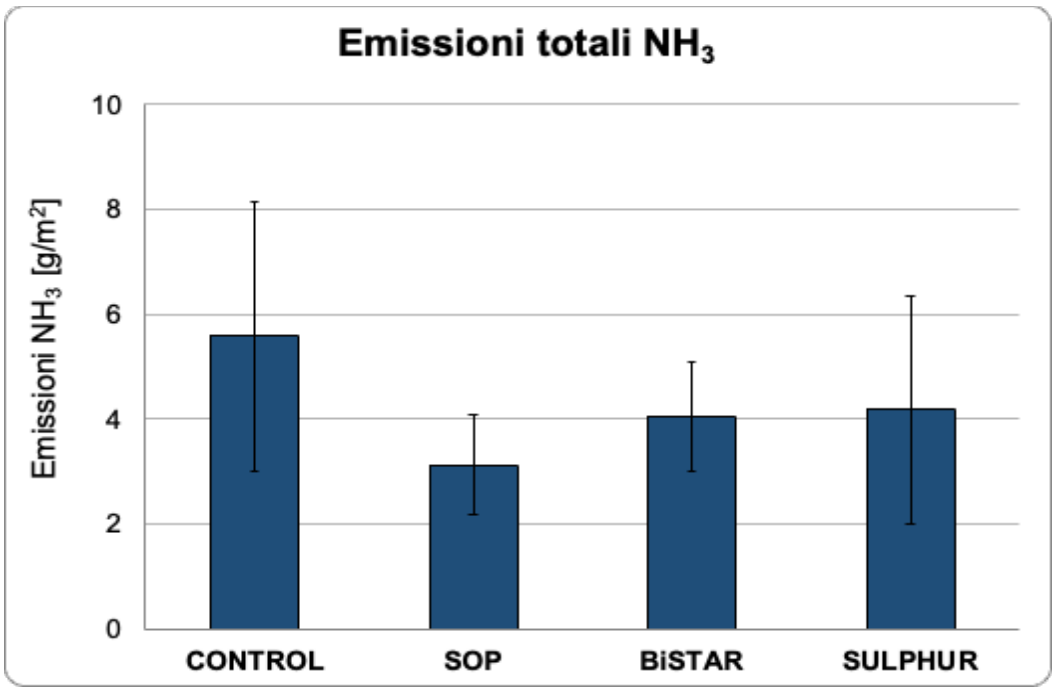


Fig. 4. Emissioni cumulative di ammoniaca

In particolare, la distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (Fig. 5) ha mostrato valori compresi indicativamente tra 3000 e 8000 mg/m². Il trattamento di controllo ha evidenziato la maggiore dispersione e alcuni dei valori massimi più elevati, mentre il trattamento SOP ha mostrato una tendenza verso valori inferiori e una variabilità più contenuta. I trattamenti BiStar e zolfo si sono collocati in una posizione intermedia, con una distribuzione più eterogenea nel caso dello zolfo.

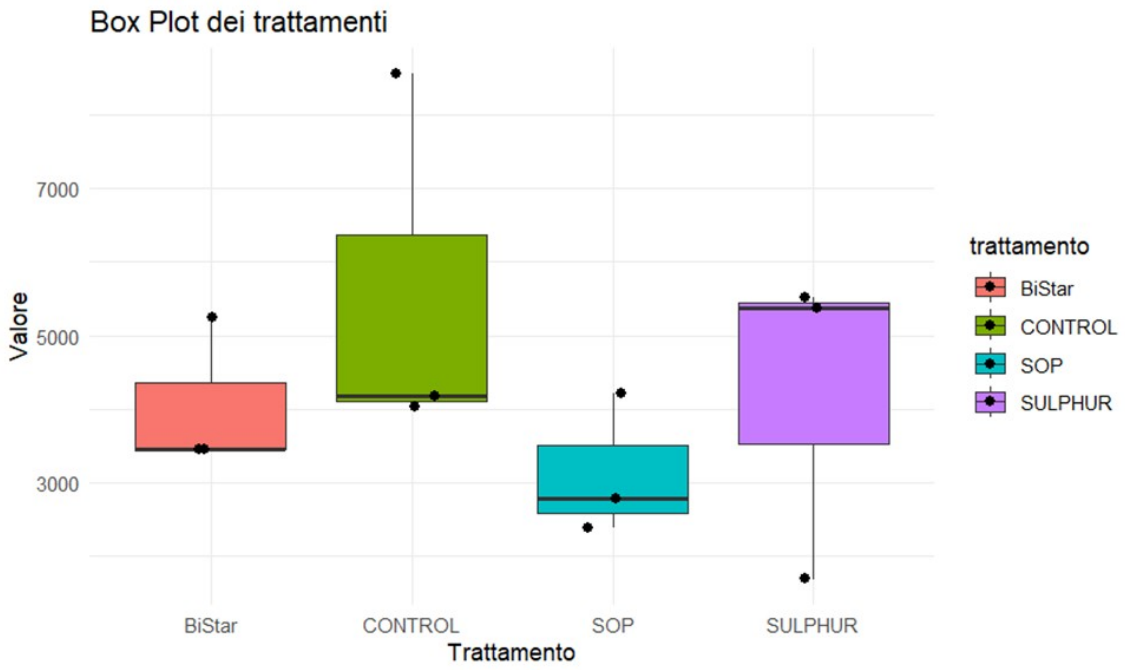


Fig. 5. Boxplot della distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (mg/m²) nei trattamenti BiStar, Controllo, SOP e zolfo nella azienda San Martino, prova invernale. Le scatole rappresentano l'intervallo interquartile (IQR), la linea centrale indica la mediana, i baffi si estendono fino a 1,5 × IQR e i punti rappresentano i valori anomali (outlier).

In termini percentuali, rispetto al controllo, le riduzioni delle emissioni sono risultate pari al 27% per BiStar, al 25% per zolfo e al 44% per SOP. Tuttavia, l'analisi della varianza non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i trattamenti (p = 0,469).

5.3. Azienda F.lli Di Francia – Prova Invernale

La prova invernale condotta presso l'azienda agricola F.lli Di Francia (Frossasco, TO) ha avuto una durata complessiva di 27 giorni. I flussi medi di ammoniaca hanno mostrato un andamento variabile nel tempo (Fig. 6), caratterizzato da valori generalmente contenuti rispetto alla prova invernale condotta presso l'azienda San Martino (Fig. 3) e da alcune oscillazioni durante il periodo di monitoraggio. All'inizio della prova, i flussi emissivi risultavano compresi tra circa 2 e 6 mg/h m², con il trattamento controllo che presentava i valori più elevati, seguito da BiStar, zolfo e SOP. Nelle successive 24 ore le emissioni emissioni si sono rapidamente ridotte in tutti i trattamenti, raggiungendo valori generalmente inferiori a 1–2 mg/h m². Successivamente, nel trattamento BiStar è stato registrato un episodio emissivo di elevata intensità, con un picco di circa 11,25 mg/h m² intorno al terzo giorno, probabilmente riconducibile all'evoluzione dei processi microbiologici e delle

condizioni fisiche del materiale. Nella fase finale del monitoraggio, il controllo e BiStar hanno mantenuto valori medi leggermente superiori rispetto a SOP e zolfo, con emissioni complessive generalmente comprese tra 1 e 3 mg/h m².

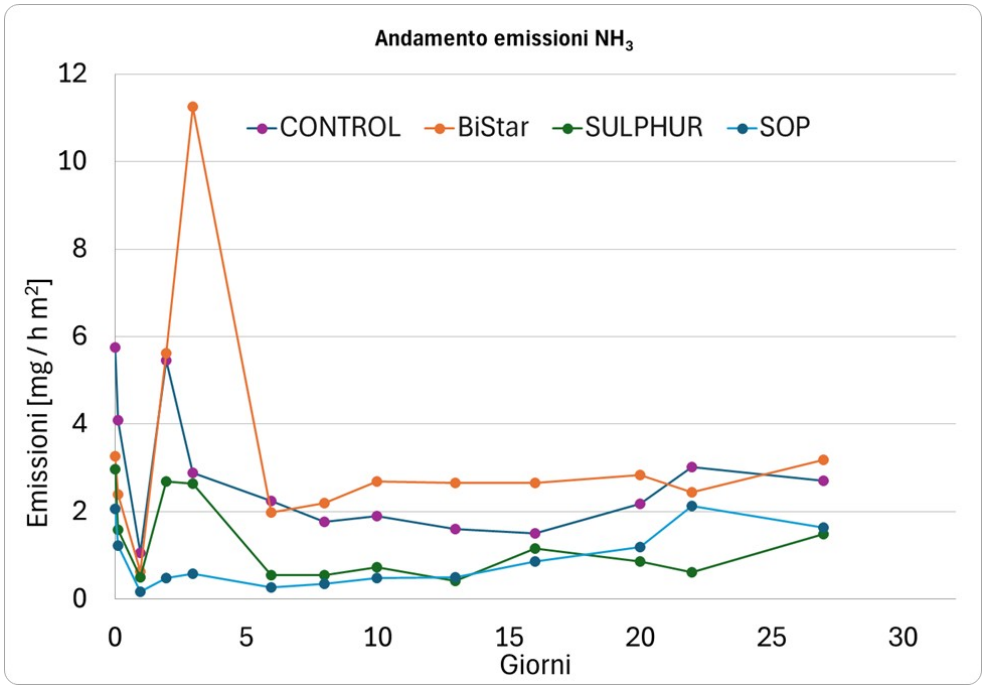


Fig. 6. Andamento temporale dei flussi emissivi di ammoniaca

Le emissioni cumulative di NH_3 (g/m^2) hanno evidenziato una marcata variabilità tra i trattamenti. Il trattamento BiStar ha mostrato il valore medio più elevato, seguito dal controllo, mentre SOP e zolfo hanno registrato i valori più bassi (Fig. 7).

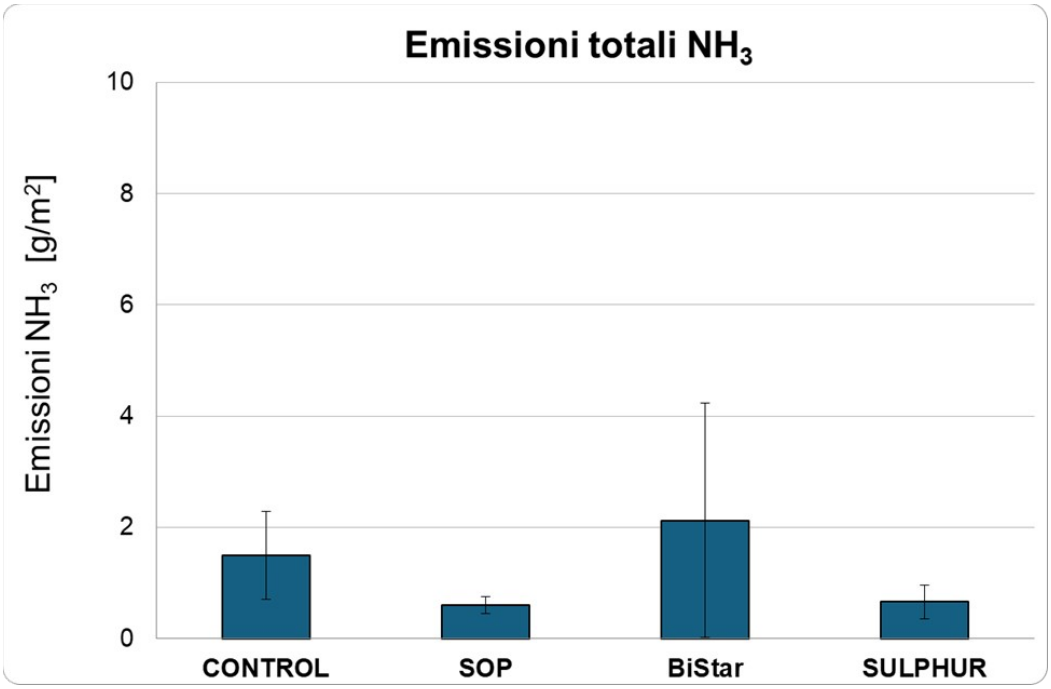


Fig. 7. Emissioni cumulative di ammoniaca

La distribuzione delle emissioni cumulative (mg/m^2) (Fig. 8) ha confermato una maggiore variabilità nel trattamento BiStar, che presenta anche i valori massimi più elevati. Il controllo e lo zolfo mostrano una variabilità intermedia, mentre SOP si caratterizza per valori costantemente più bassi e una minore dispersione dei dati. Nel complesso, la distribuzione evidenzia una chiara separazione tra il trattamento SOP e gli altri, mentre le restanti tesi risultano più sovrapposte tra loro.

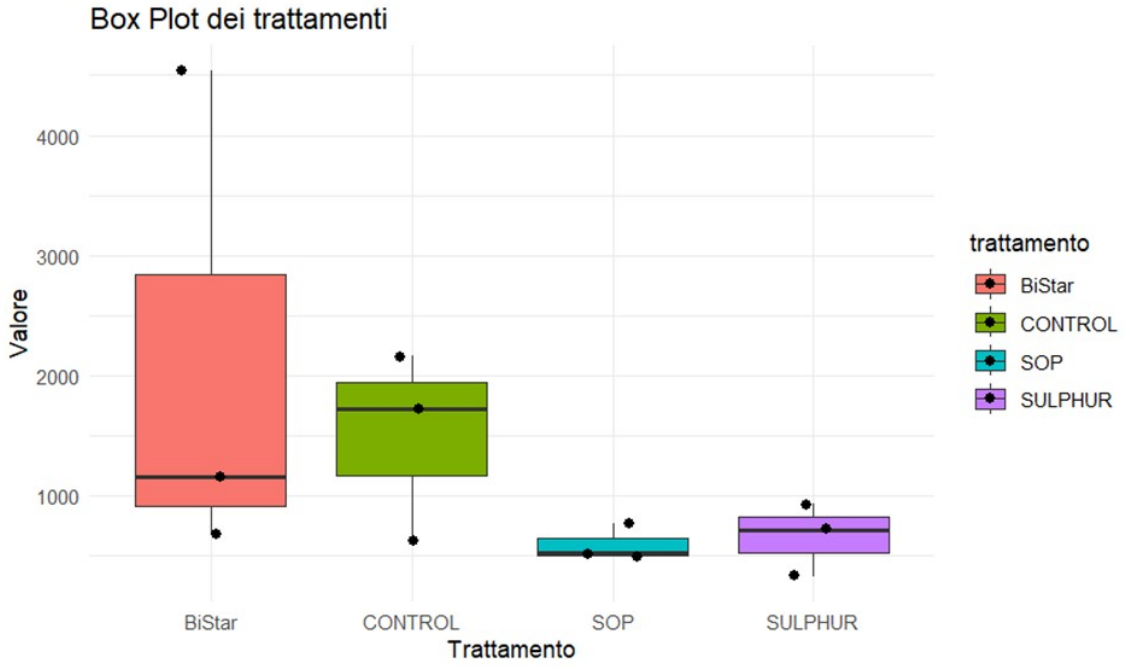


Fig. 8. Boxplot della distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (mg/m²) – Azienda F.lli Francia, prova invernale.

In termini percentuali, rispetto al controllo, SOP e zolfo hanno mostrato riduzioni delle emissioni pari rispettivamente al 60,31% e al 56,07%, mentre il trattamento BiStar ha evidenziato un incremento delle emissioni pari al 41,62%. Tuttavia, l'analisi della varianza non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i trattamenti per le emissioni cumulative di NH_3 ($p = 0,359$).

Il monitoraggio della temperatura del letame durante la prova ha evidenziato leggere differenze tra i trattamenti, con valori medi compresi tra 17,3 e 22,2°C (Fig. 9). Il controllo ha mostrato la temperatura media interna più elevata (22,2°C), seguito dallo zolfo (19,8°C), BiStar (19 °C) e SOP (17,3°C). Le temperature minime registrate hanno evidenziato una certa variabilità tra i trattamenti, con valori compresi tra 6,2°C (SOP) e 11,1°C (controllo). Le temperature massime hanno mostrato un intervallo più ampio, variando da 32,3°C (SOP) a 34°C (controllo). Nel complesso, il trattamento controllo ha generalmente presentato i valori termici medi più elevati, mentre il trattamento SOP ha mostrato mediamente le temperature più basse. Le differenze tra i trattamenti risultano comunque contenute, con un andamento termico complessivamente simile tra le tesi. Le temperature ambientali si sono mantenute su valori nettamente inferiori rispetto a quelle della massa di letame, con una media di 7,5°C e un intervallo compreso tra 0,2°C e 20,1°C.

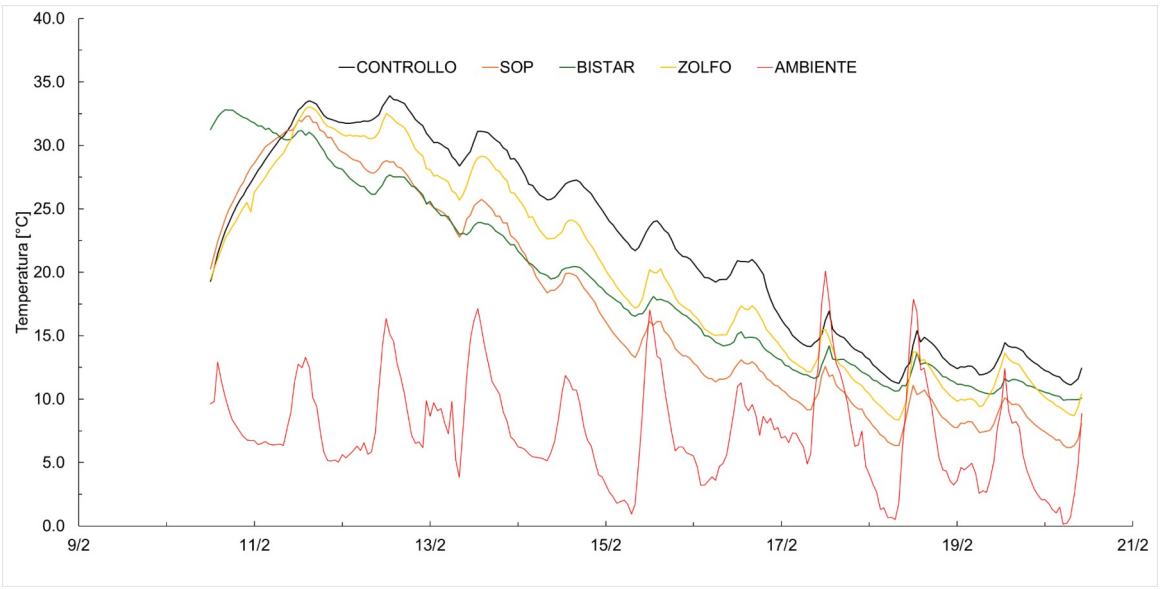


Fig. 9 Andamento della temperatura del letame durante il periodo sperimentale

Rispetto all'azienda San Martino, il letame proveniente dall'azienda F.lli Di Francia presentava una struttura visivamente più compatta (Fig. 10), probabilmente riconducibile all'interazione tra le caratteristiche del materiale (contenuto di umidità, composizione della lettiera, grado di degradazione) e le modalità di gestione e movimentazione durante la rimozione dai recinti.



Fig. 10 Struttura del letame bovino proveniente dall'azienda F.lli Di Francia. L'elevato grado di addensamento della matrice suggerisce una ridotta porosità e permeabilità all'aria, con possibili effetti sui processi di diffusione dei gas e sull'attività microbiologica.

Tale configurazione strutturale potrebbe avere ridotto la porosità e la permeabilità all'aria della massa, limitando gli scambi gassosi e l'apporto di ossigeno all'interno del cumulo. In queste condizioni, l'attività dei microrganismi aerobi può risultare meno intensa, contribuendo a spiegare i modesti incrementi di temperatura osservati durante la prova. La limitata evoluzione termica osservata durante la prova potrebbe aver influenzato anche le dinamiche emissive. Una minore intensità dei processi aerobici e una ridotta permeabilità della massa possono infatti modificare sia la produzione sia il trasporto dell'ammoniaca verso la superficie, contribuendo alla variabilità dei flussi emissivi osservata tra le diverse aziende.

5.4. Azienda Garelli – Prova Invernale

La prova condotta presso l'azienda Garelli (Mondovì, CN) ha avuto una durata complessiva di 60 giorni. Si è evidenziato un andamento delle emissioni di ammoniaca caratterizzato da valori complessivamente molto contenuti ma con evidenti fluttuazioni. (Fig. 11). All'inizio della prova, il trattamento controllo ha mostrato il flusso emissivo più elevato, seguito da SOP, BiStar e zolfo. Durante i primi giorni di monitoraggio tutti i trattamenti hanno evidenziato una rapida riduzione dei flussi emissivi, con valori prossimi allo zero già entro la prima settimana. Successivamente, a partire da circa 20 giorni dall'inizio della prova, è stato osservato un moderato incremento delle emissioni in tutti i trattamenti. In questa fase lo zolfo ha avuto l'incremento maggiore di emissione di ammoniaca (0.55 mg/h m^2). Un evento analogo è avvenuto anche al 30esimo giorno dove il controllo ha raggiunto il valore massimo registrato durante il monitoraggio (0,60 mg/h m^2). Nella fase finale del monitoraggio, le emissioni si sono mantenute relativamente basse per tutti i trattamenti, con oscillazioni limitate e valori generalmente inferiori a 0,4 mg/h m^2.

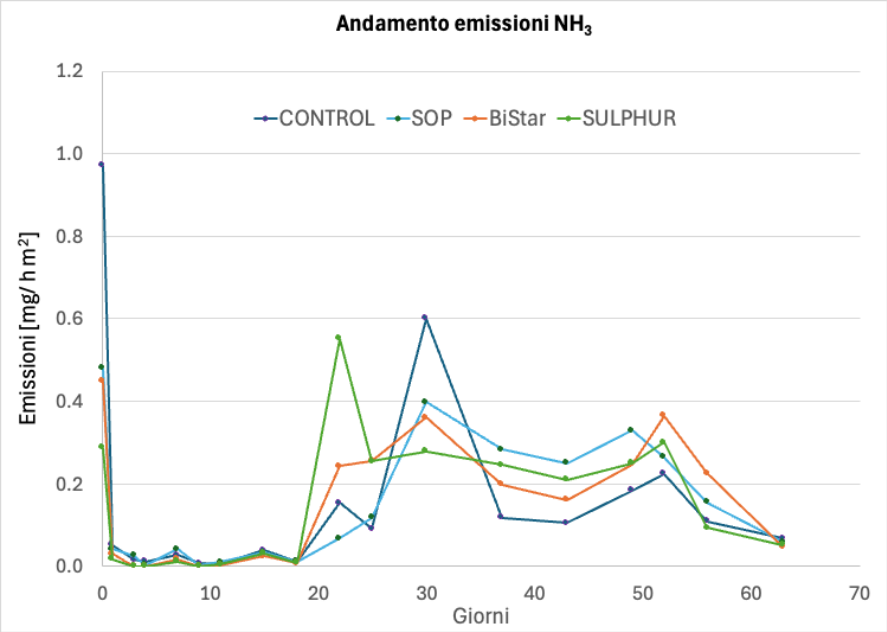


Fig. 11. Andamento temporale dei flussi emissivi di ammoniaca.

Le emissioni cumulative di NH_3 (g/m^2) hanno mostrato valori medi simili fra i trattamenti (Fig. 12). Il trattamento controllo ha registrato il valore medio più basso, mentre i trattamenti con additivi hanno mostrato emissioni cumulative leggermente superiori.

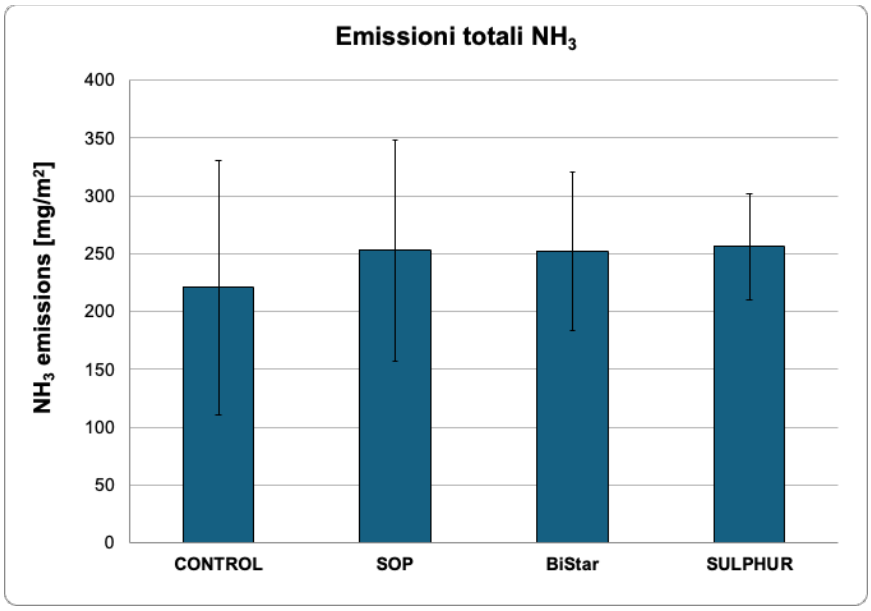


Fig. 12. Emissioni cumulative di ammoniaca.

La distribuzione delle emissioni cumulative (mg/m^2) (Fig. 13) evidenzia differenze nella variabilità tra i trattamenti. BiStar presenta valori mediani leggermente più elevati rispetto agli altri trattamenti, mentre SOP e controllo mostrano una maggiore dispersione dei dati e la presenza di valori estremi. Il trattamento con zolfo risulta invece caratterizzato da una distribuzione più compatta e da una minore variabilità complessiva. Nel complesso, le distribuzioni risultano parzialmente sovrapposte, indicando differenze contenute tra i trattamenti.

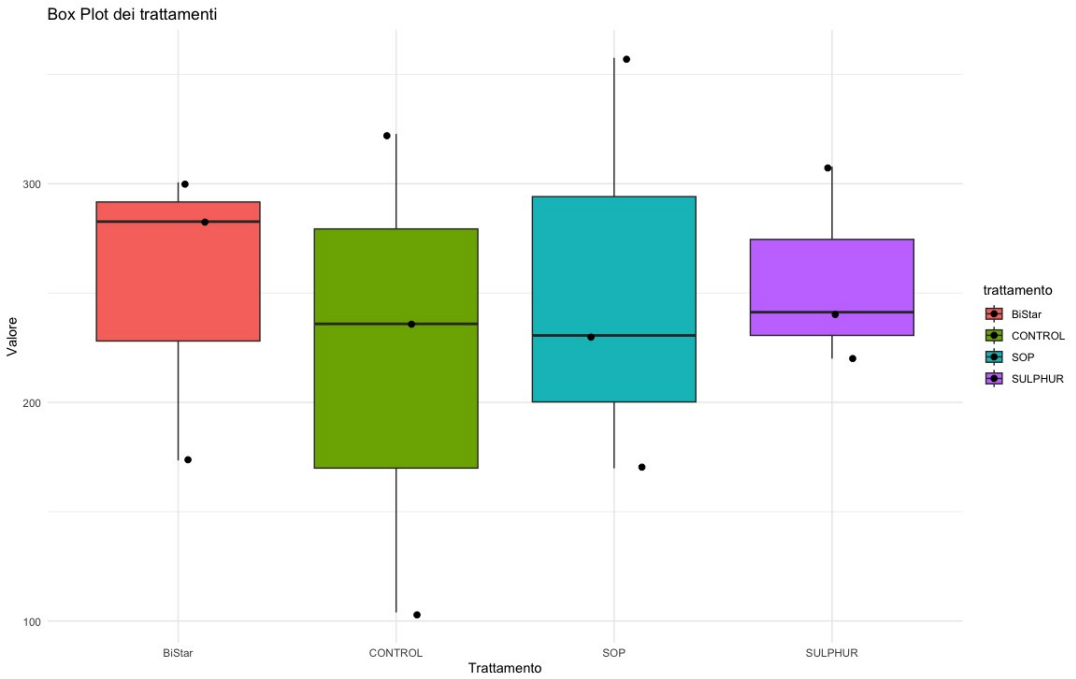


Fig. 13. Boxplot della distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (mg/m²) – Azienda Garelli, prova invernale.

In termini percentuali rispetto al controllo, i trattamenti hanno mostrato un incremento delle emissioni pari al 14,40% per SOP, 14,21% per BiStar e 16,07% per zolfo. Tuttavia, l'analisi statistica condotta mediante ANOVA a una via non ha evidenziato differenze significative tra i trattamenti in termini di emissioni cumulative di NH_3 ($p = 0.947$).

Il monitoraggio della temperatura del letame durante la prova ha evidenziato differenze contenute tra i trattamenti, con valori medi compresi in un intervallo molto ristretto, tra 14,0 e 15,3°C (Fig. 14). Il trattamento con zolfo ha mostrato la temperatura media interna più elevata (15,3°C), seguito da SOP (14,3°C), BiStar (14,1°C) e controllo (13,9°C). Le temperature minime cono risultate comprese tra 1,3°C (BiStar) e 3,6°C (Zolfo). Le

temperature massime hanno mostrato un intervallo più ampio, variando da 26,7°C (controllo) a 30,1°C (SOP). Nel complesso, le differenze tra i trattamenti sono risultate contenute, con andamenti termici piuttosto simili. Il trattamento zolfo ha tendenzialmente presentato valori medi leggermente più elevati, mentre il controllo ha mostrato valori medi più bassi. Le temperature ambientali hanno invece evidenziato una variabilità più ampia rispetto alle matrici organiche, con una media pari a 14,1°C e un intervallo compreso tra -1,0°C e 45,8°C.

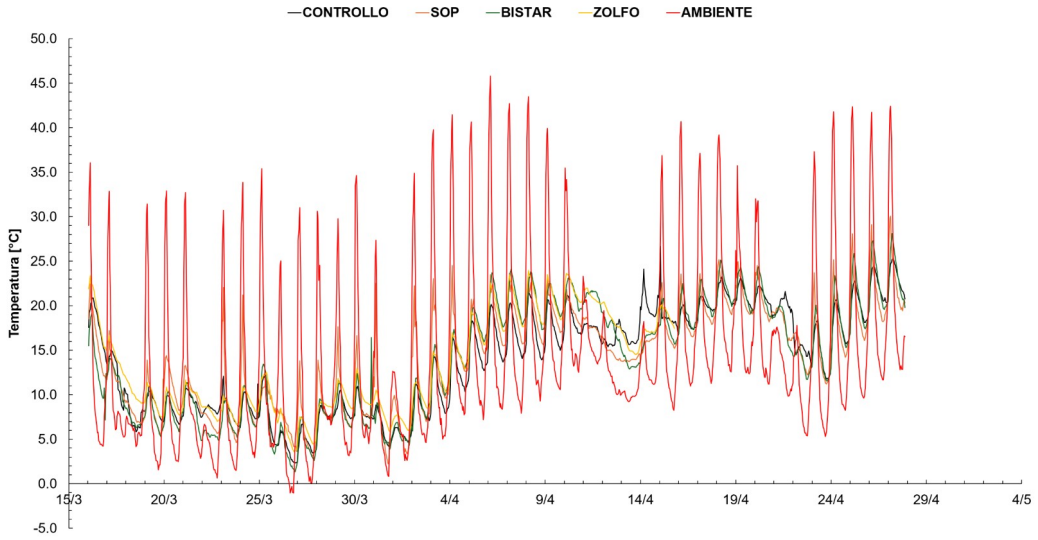


Fig. 14 Andamento della temperatura del letame durante il periodo sperimentale

Anche in questo caso, rispetto all'azienda San Martino, il letame proveniente dall'azienda Garelli presentava una struttura visivamente più compatta e addensata (Fig. 15), caratterizzata da una limitata presenza di vuoti macroscopici e da una marcata coesione della matrice e la conseguente limitazione degli scambi gassosi tra l'interno della massa e l'atmosfera. Ciò può ridurre l'apporto di ossigeno ai microrganismi aerobi, limitando l'intensità dei processi di biodegradazione e dell'autoriscaldamento del materiale. Le temperature relativamente contenute osservate durante la prova risultano coerenti con questa interpretazione e suggeriscono che, nelle condizioni sperimentali investigate, la struttura fisica del letame possa avere esercitato un ruolo più rilevante dei trattamenti nel condizionare l'evoluzione dei processi biologici e, indirettamente, le dinamiche emissive.



Fig. 15. Aspetto del letame bovino proveniente dall'azienda Garelli all'avvio della sperimentazione

5.5. Azienda San Martino – Prova Estiva

La prova estiva condotta presso l'azienda agricola San Martino è stata effettuata su un periodo di monitoraggio complessivo di 32 giorni. I flussi medi di ammoniaca hanno evidenziato un marcato andamento decrescente nel tempo per tutti i trattamenti, con emissioni iniziali molto elevate seguite da una rapida diminuzione e successiva stabilizzazione su valori bassi nella fase finale del monitoraggio (Fig. 16). All'inizio del periodo di osservazione, i flussi emissivi risultavano elevati, compresi tra circa 31 e 40 mg/h m². Il controllo ha mostrato il valore più elevato, seguito da SOP, zolfo e BiStar. Dopo soli pochi giorni, è stata osservata una riduzione molto rapida delle emissioni per tutti i trattamenti, con valori compresi tra circa 2 e 8 mg/h m². Tuttavia, è stato osservato un evidente picco emissivo in data 4 luglio (giorno 25), durante il quale tutti i trattamenti hanno mostrato un aumento simultaneo dei flussi di NH_3, in coincidenza con un evento di precipitazione. I valori medi sono aumentati da circa 0,22 a 1,34 mg/h m², corrispondente a un incremento di circa sei volte rispetto ai valori precedenti. Nella fase finale, i flussi si sono mantenuti costantemente bassi per tutti i trattamenti, generalmente inferiori a 1 mg/h m², indicando una stabilizzazione del sistema emissivo.

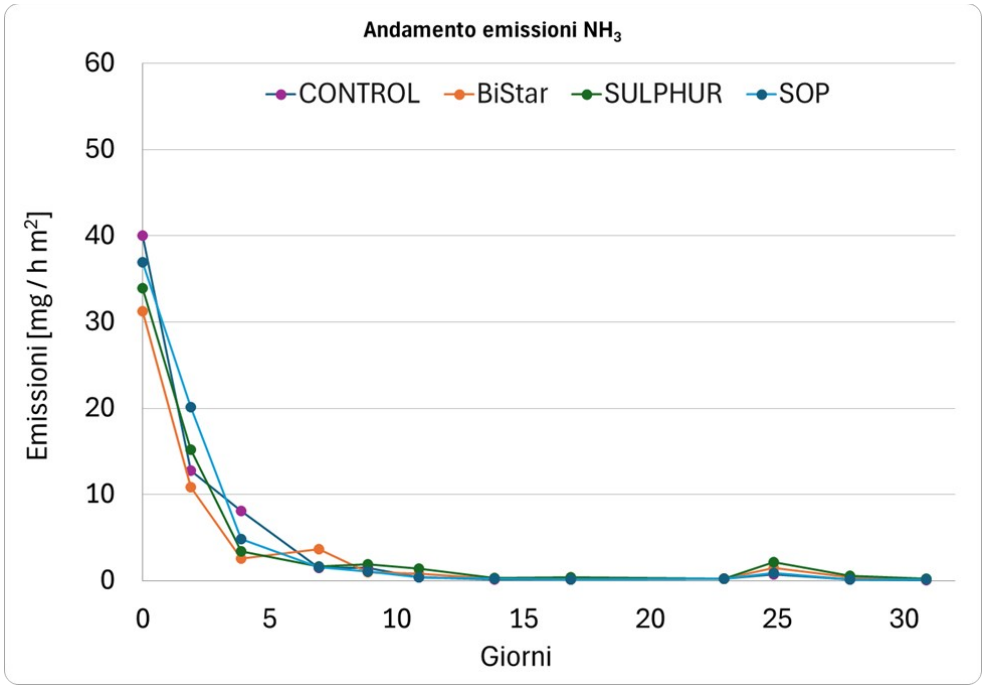


Fig. 16. Andamento temporale dei flussi emissivi di ammoniaca

Le emissioni cumulative di NH_3 (g/m^2) hanno mostrato valori simili tra i trattamenti. SOP ha mostrato il valore medio più elevato, seguito dal controllo, dallo zolfo e da BiStar (Fig. 17).

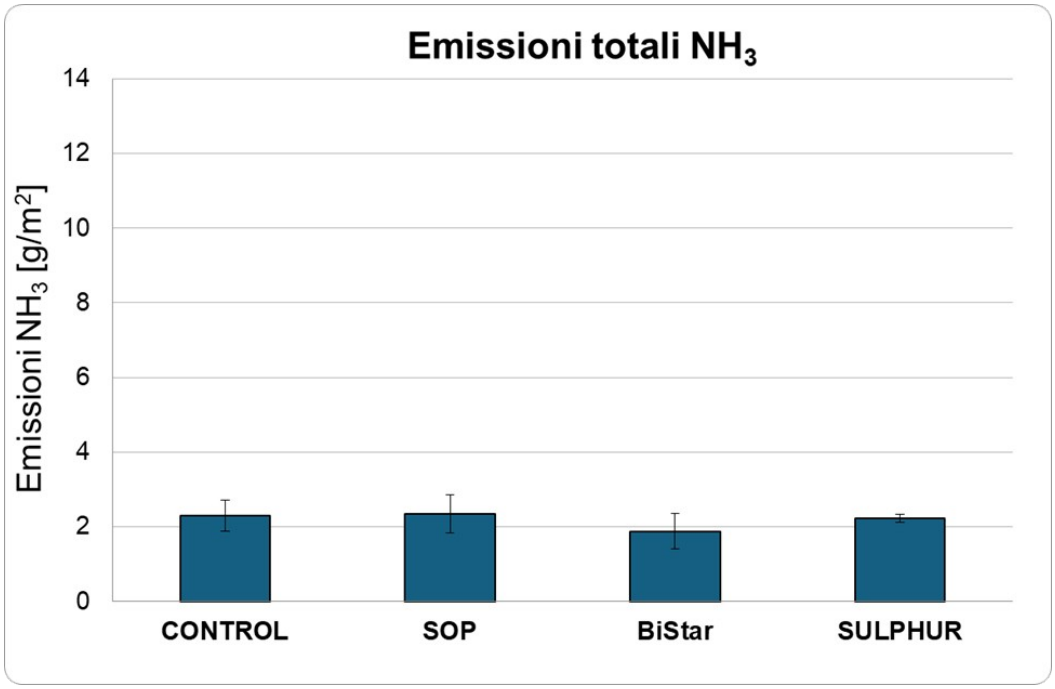


Fig. 17. Emissioni cumulative di ammoniaca

La distribuzione delle emissioni cumulative (mg/m^2) (Fig. 18) evidenzia differenze limitate tra i trattamenti. SOP mostra valori mediani leggermente più elevati e una maggiore variabilità dei dati, mentre BiStar presenta i valori mediani più bassi. Il controllo e il trattamento con zolfo si collocano in posizione intermedia, con distribuzioni tra loro comparabili e una variabilità moderata. Nel complesso, le distribuzioni risultano parzialmente sovrapposte, indicando differenze contenute tra i trattamenti.

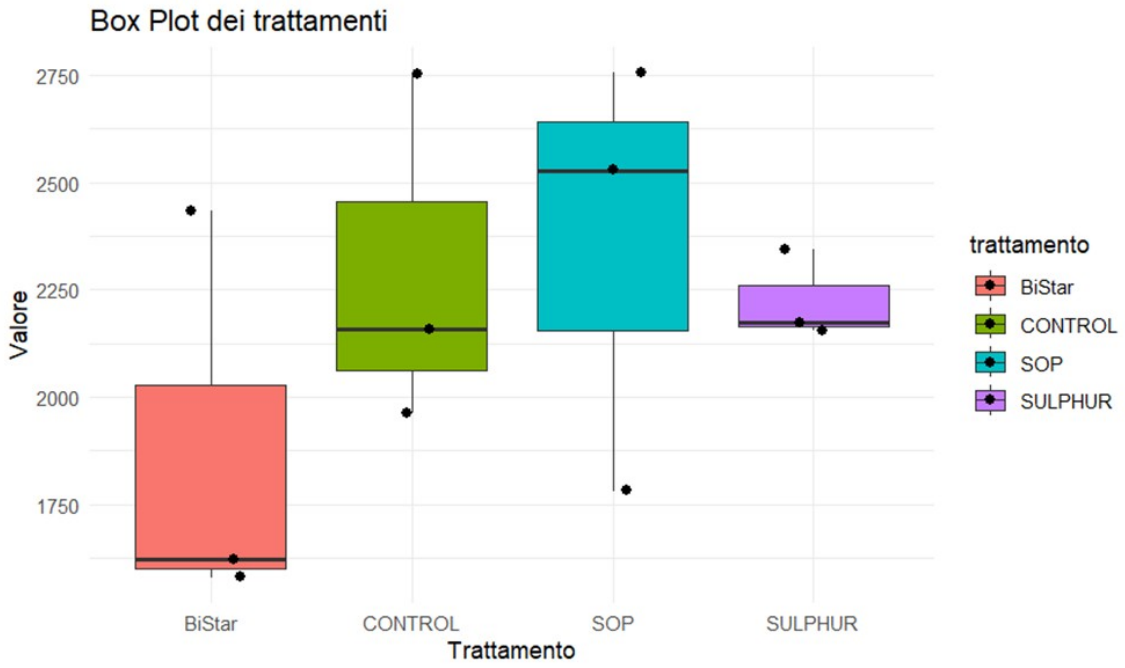


Fig. 18. Boxplot della distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (mg/m^2) – Azienda San Martino, prova estiva.

In termini percentuali rispetto al controllo SOP ha mostrato un lieve aumento delle emissioni pari +2,78%, lo zolfo una riduzione marginale del −2,94% mentre BiStar una riduzione più evidente del −18,04%. Tuttavia, dal punto di vista statistico, l'analisi della varianza non ha evidenziato differenze significative tra i trattamenti ($p = 0,524$).

Il monitoraggio della temperatura del letame durante la prova ha evidenziato valori medi compresi tra 38,8 e 41,2°C (Fig. 19). Il trattamento BiStar ha mostrato la temperatura media interna più elevata (41,2°C), seguito da zolfo (40,3°C), controllo (40,2°C) e SOP (38,8°C). Le temperature minime registrate sono risultate comprese tra 14,9°C e 18,5°C, con il valore più basso osservato nel trattamento zolfo e il più elevato nel controllo. Le temperature massime hanno invece raggiunto valori compresi tra 64°C (SOP) e 70,2°C (BiStar). Le

temperature ambientali hanno mostrato valori medi inferiori rispetto alle matrici organiche (30,2°C), con un intervallo compreso tra 12,1°C e 47,3°C.

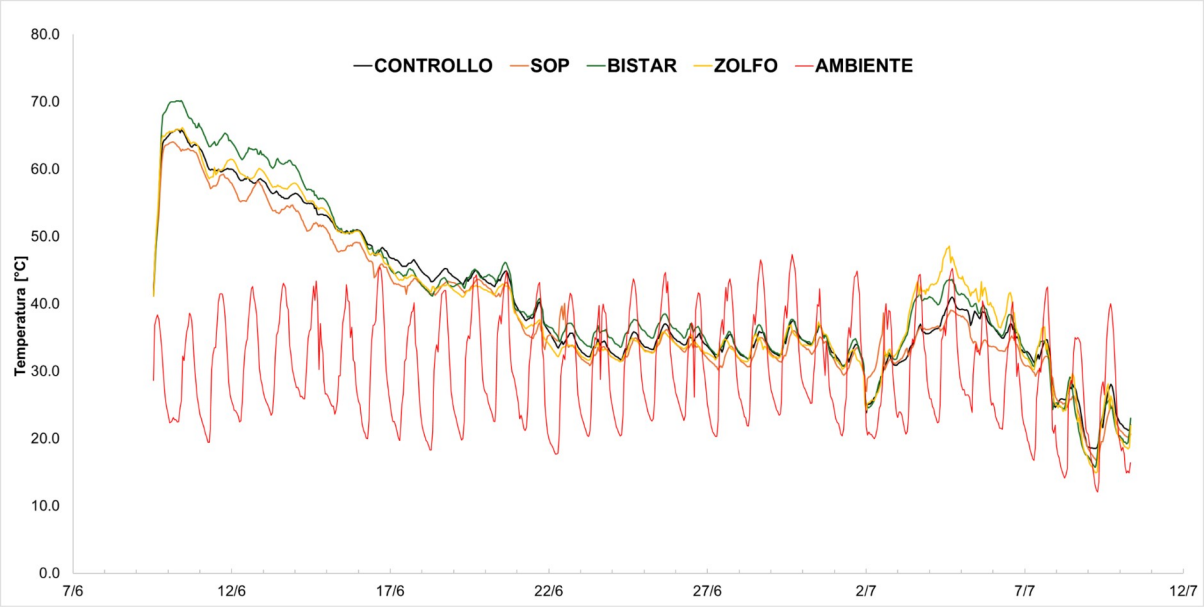


Fig. 19. Andamento della temperatura del letame durante il periodo sperimentale

5.6. Azienda F.lli Di Francia – Prova Estiva

La prova estiva presso l'azienda agricola F.lli Di Francia è durata circa 25 giorni. I flussi medi di ammoniaca hanno mostrato un andamento variabile nel tempo, simile per tutti i trattamenti (Fig. 20). All'inizio del monitoraggio, i flussi risultavano relativamente bassi, compresi tra circa 5 e 7 mg/h m². Nei giorni successivi è stato osservato un rapido aumento delle emissioni, con valori che hanno raggiunto circa 25–32 mg/h m². Al sesto giorno di misurazione si è osservato un secondo picco emissivo più marcato, particolarmente evidente nel controllo, mentre gli altri trattamenti hanno mostrato valori compresi indicativamente tra 31 e 41 mg/h m². Successivamente, le emissioni hanno subito una progressiva riduzione. Nella fase finale, tutti i trattamenti hanno mostrato valori più bassi e relativamente stabili, generalmente compresi tra 2 e 8 mg/h m², con lievi fluttuazioni.

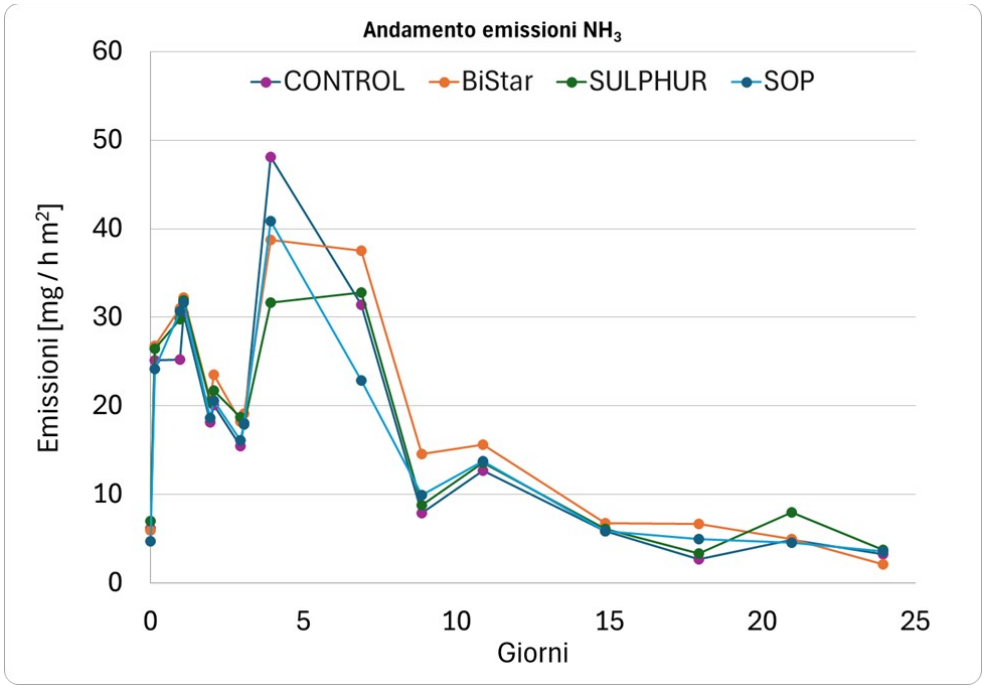


Fig. 20. Andamento temporale dei flussi emissivi di ammoniaca

Le emissioni cumulative di NH_3 (g/m^2) hanno mostrato valori differenti fra i trattamenti. BiStar ha mostrato il valore medio più elevato, seguito dal controllo, dallo zolfo e da SOP (Fig. 21).

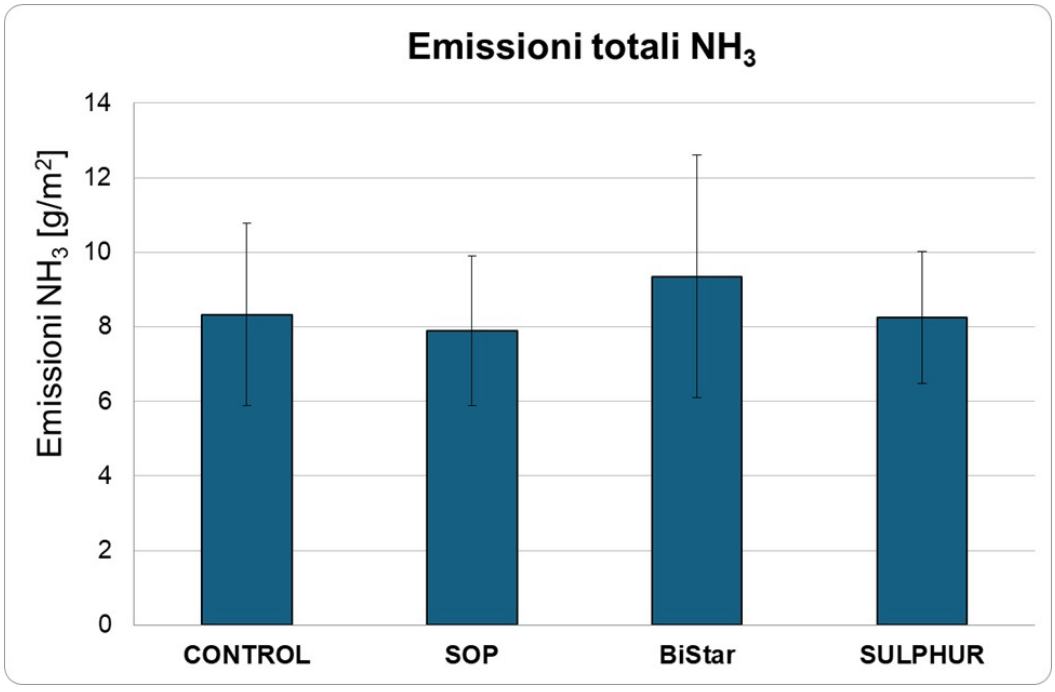


Fig. 21. Emissioni cumulative di ammoniaca

La distribuzione delle emissioni cumulative (mg/m^2) (Fig. 22) evidenzia una variabilità marcata tra i trattamenti. Il controllo e BiStar mostrano una maggiore dispersione dei dati e la presenza di valori elevati isolati, mentre SOP presenta valori mediani più bassi e una minore variabilità complessiva. Il trattamento con zolfo si colloca in posizione intermedia, con una distribuzione relativamente più compatta rispetto al controllo e a BiStar.

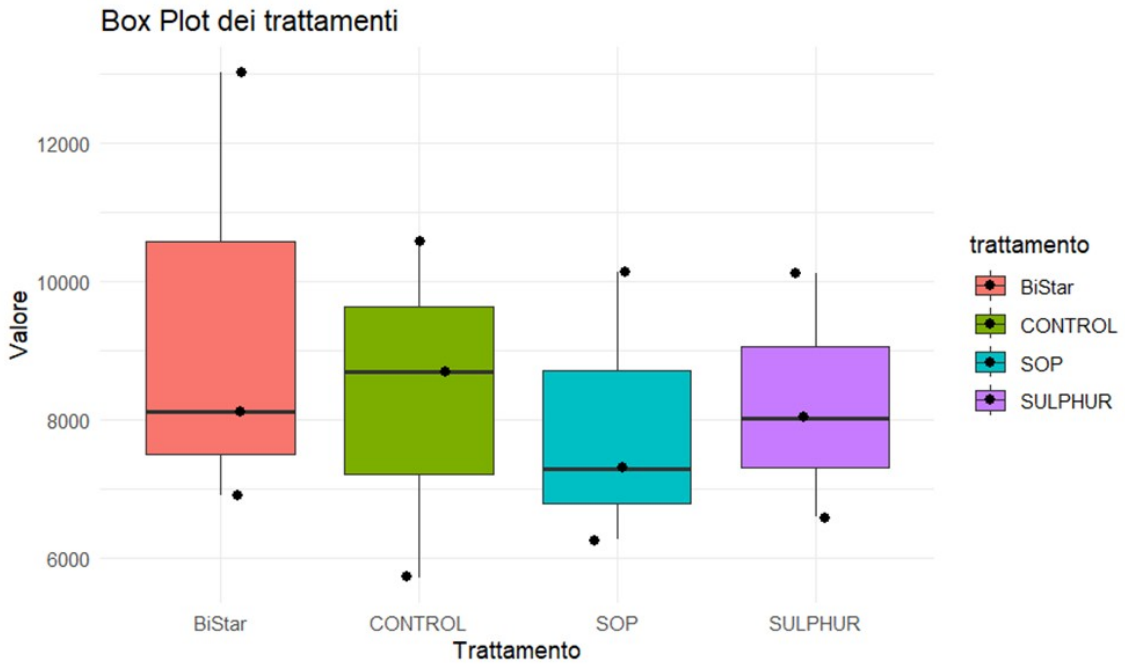


Fig. 22. Boxplot della distribuzione delle emissioni cumulative di NH_3 (mg/m²) – Azienda F.lli Francia, prova estiva.

In termini percentuali rispetto al controllo, SOP ha mostrato una lieve riduzione delle emissioni pari a −5,17%, lo zolfo una riduzione marginale pari a −1,07%, mentre BiStar ha evidenziato un incremento delle emissioni pari a +12,22%. Tuttavia, l'analisi della varianza a una via non ha evidenziato differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p = 0,896$).

Il monitoraggio della temperatura del letame durante la prova ha evidenziato differenze tra i trattamenti, con valori medi compresi tra 33,3 e 41,2°C (Fig. 23). Il trattamento BiStar ha mostrato la temperatura media interna più elevata (41,2°C), seguito da zolfo (40,3°C), SOP (38,8°C) e controllo (33,3°C). Le temperature minime registrate sono risultate comprese tra 14,9°C e 23,2°C. Le temperature massime hanno raggiunto valori compresi tra 60,5°C

(controllo) a 70,2°C (BiStar). Le temperature ambientali hanno evidenziato valori medi inferiori rispetto alle matrici organiche (30,2°C), con un intervallo compreso tra 12,1°C e 47,3°C.

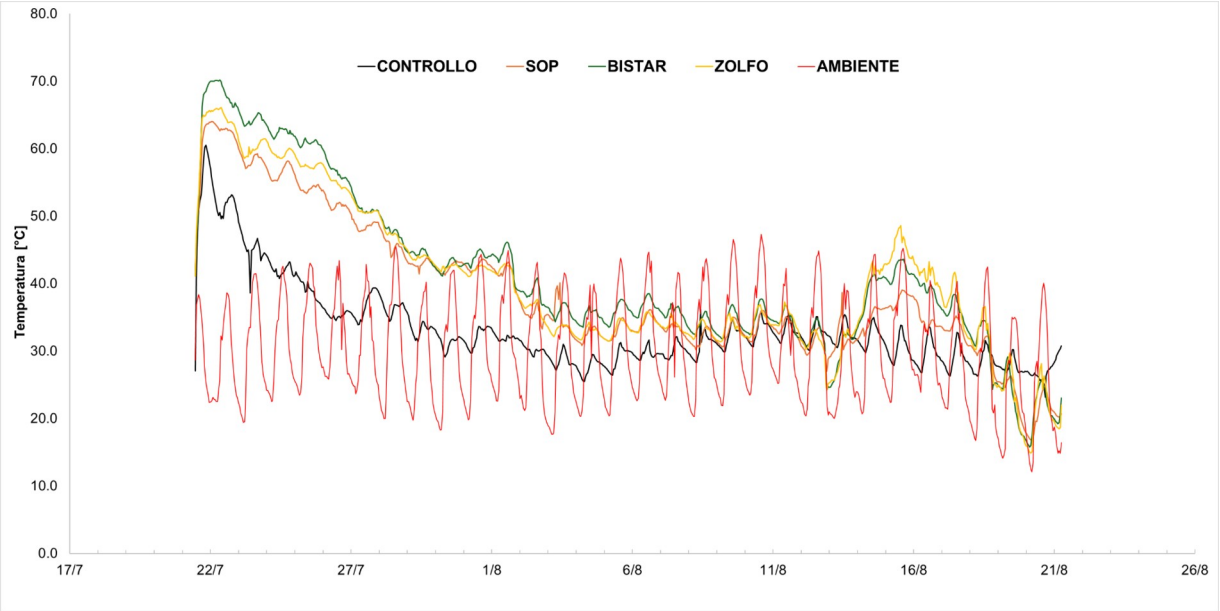


Fig. 23. Andamento della temperatura del letame durante il periodo sperimentale

6. Discussione

Nel complesso, le dinamiche emissive osservate sono risultate coerenti con quanto riportato in letteratura (Amon et al., 2006; Pagans et al., 2006), evidenziando come la quota prevalente delle emissioni si concentri nelle prime fasi dello stoccaggio, quando il materiale presenta la maggiore disponibilità di azoto ammoniacale e condizioni favorevoli alla volatilizzazione.

L'andamento temporale delle emissioni ha mostrato, in quasi tutte le prove, un rapido decremento dei flussi nei primi giorni di monitoraggio, seguito da una fase di progressiva stabilizzazione. In alcuni casi sono stati osservati episodi emissivi secondari, generalmente di breve durata, che potrebbero essere ricondotti all'evoluzione dei processi biologici all'interno della massa, alle variazioni delle condizioni microclimatiche o a fenomeni di riumidificazione del materiale conseguenti agli eventi meteorici. Tali osservazioni confermano come le emissioni di ammoniaca rappresentino il risultato dell'interazione tra processi chimici, fisici e microbiologici in continua evoluzione durante la maturazione del letame.

Dal punto di vista della composizione del materiale, le analisi hanno evidenziato una progressiva riduzione dell'azoto ammoniacale durante lo stoccaggio, accompagnata da un incremento della sostanza secca, particolarmente marcata nelle prove estive, e dal mantenimento di valori di pH alcalini. L'apparente aumento delle concentrazioni di fosforo e potassio è risultato principalmente riconducibile all'effetto di concentrazione conseguente alla perdita di acqua e alla degradazione della sostanza organica. Pur non essendo stato monitorato il percolato prodotto durante lo stoccaggio, non si può escludere che una quota di nutrienti sia stata trasferita attraverso la frazione liquida drenata, contribuendo al bilancio complessivo dei nutrienti.

L'aspetto di maggiore interesse emerso dalla sperimentazione riguarda tuttavia il ruolo esercitato dalle caratteristiche fisiche del letame. Le differenze osservate tra le aziende non sono risultate pienamente spiegabili dai soli parametri chimici determinati, suggerendo che la struttura della matrice possa rappresentare un fattore determinante nel controllo dei processi di maturazione e delle emissioni.

Nel corso delle prove, i letami provenienti dalle aziende F.lli Di Francia e Garelli hanno mostrato una struttura visivamente più compatta rispetto al materiale dell'azienda San Martino. Tale configurazione è verosimilmente riconducibile all'interazione tra numerosi fattori, quali il contenuto di umidità, la quantità e le caratteristiche della lettiera, il tempo di permanenza nei recinti, il calpestamento animale e le modalità di movimentazione e rimozione del letame mediante pala meccanica. Tali fattori possono modificare la densità apparente, la porosità totale, la porosità occupata dall'aria (air-filled porosity), la permeabilità all’aria e la permeabilità all’acqua del materiale, influenzando i processi di trasferimento di composti gassosi, acqua e calore all'interno della massa. In particolare, una riduzione della porosità occupata dall'aria e della permeabilità all'aria può limitare la diffusione dell'ossigeno e l'attività dei microrganismi aerobi, rallentando i processi di biodegradazione e di autoriscaldamento del cumulo. Tale interpretazione risulta coerente con gli andamenti termici osservati nelle prove condotte presso le aziende F.lli Di Francia e Garelli, dove l'incremento della temperatura è risultato generalmente più contenuto rispetto all'azienda San Martino, suggerendo una minore intensità dei processi aerobici. Parallelamente, la struttura fisica può influenzare anche il trasporto diffusivo dell'ammoniaca verso la superficie del cumulo, modificando la distribuzione temporale delle emissioni.

Queste osservazioni risultano coerenti con la letteratura di settore, che riconosce un ruolo fondamentale delle proprietà strutturali nel controllo dei processi di trasferimento di massa e calore durante la maturazione delle matrici organiche (Richard et al., 2004). In particolare, studi recenti sul letame bovino hanno dimostrato che il trasporto dei composti gassosi avviene prevalentemente per diffusione attraverso la matrice porosa e che le proprietà fisiche del materiale, quali umidità, densità apparente, porosità occupata dall'aria, resistenza meccanica e permeabilità, interagiscono nel controllare i flussi emissivi (Chang et al., 2023). Ne consegue che il grado di compattamento non rappresenta di per sé un fattore predittivo delle emissioni, ma costituisce uno degli elementi che contribuiscono a definire la struttura fisica del mezzo poroso e, quindi, i processi di trasferimento di massa che regolano le emissioni gassose.

Questa interpretazione assume particolare rilevanza anche ai fini della valutazione dell'efficacia degli additivi, poiché suggerisce che la risposta ai trattamenti possa dipendere non solo dalle caratteristiche intrinseche dei prodotti impiegati, ma anche dalle proprietà fisiche del letame e dalle condizioni di gestione che ne influenzano l'evoluzione durante lo stoccaggio. In particolare, nessuno dei formulati valutati ha determinato riduzioni statisticamente significative delle emissioni cumulative di ammoniaca nelle differenti condizioni sperimentali investigate. Tuttavia, in alcune prove sono state osservate riduzioni medie anche consistenti rispetto al controllo, sebbene caratterizzate da un'elevata variabilità tra repliche, aziende e campagne stagionali. Tale evidenza risulta in linea con quanto riportato nelle più recenti meta-analisi internazionali, che evidenziano una notevole variabilità dell'efficacia delle strategie di mitigazione in funzione delle condizioni sperimentali (Cao et al., 2019). Parametri quali densità apparente, porosità, permeabilità, contenuto di umidità e modalità di gestione possono influenzare sia la distribuzione dell'additivo all'interno della massa sia i processi di trasferimento dell'ossigeno, dell'acqua e dei composti gassosi sui quali gli additivi stessi sono chiamati ad agire.

7. Conclusioni

Il progetto STREAL2 ha consentito di consolidare e ampliare le conoscenze sui processi che regolano le emissioni di ammoniaca durante lo stoccaggio del letame bovino, attraverso una

sperimentazione condotta in condizioni operative rappresentative delle aziende zootecniche piemontesi.

Le prove hanno confermato che le perdite di ammoniaca risultano fortemente concentrate nelle prime fasi dello stoccaggio e sono influenzate da un insieme complesso di fattori ambientali, gestionali e strutturali. In particolare, temperatura, stagionalità e caratteristiche del letame hanno mostrato un'influenza maggiore rispetto ai trattamenti applicati, evidenziando l'elevata variabilità che caratterizza i processi emissivi nei sistemi aziendali reali.

Gli additivi oggetto della sperimentazione hanno mostrato effetti differenti nelle diverse condizioni investigate, senza evidenziare riduzioni statisticamente significative delle emissioni cumulative di ammoniaca. Tali risultati non ridimensionano il potenziale interesse verso queste tecnologie, ma evidenziano come la loro efficacia dipenda in misura determinante dall'interazione con le caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche del letame e con le modalità di gestione aziendale.

Uno degli elementi di maggiore interesse emersi dal progetto riguarda il possibile ruolo della struttura fisica del letame nel controllo dei processi di maturazione e delle dinamiche emissive. Le osservazioni effettuate durante la sperimentazione suggeriscono che proprietà quali densità apparente, porosità e permeabilità possano influenzare significativamente gli scambi gassosi, l'attività microbiologica, l'evoluzione della temperatura e, conseguentemente, la volatilizzazione dell'azoto ammoniacale. Sebbene tali parametri non siano stati misurati direttamente nell'ambito del progetto, essi rappresentano una promettente linea di approfondimento scientifico.

I risultati ottenuti suggeriscono pertanto che lo sviluppo di additivi innovativi debba essere accompagnato dalla definizione di criteri tecnico-scientifici che ne consentano l'ottimizzazione dell'impiego in funzione delle caratteristiche del letame e delle specifiche condizioni di gestione aziendale. In questa prospettiva, l'efficacia degli additivi non può essere considerata una proprietà intrinseca del formulato, ma una proprietà del sistema additivo–letame–gestione, nel quale le caratteristiche della matrice e le modalità di stoccaggio rivestono un ruolo determinante. Tale approccio rappresenta una solida base

scientifica per lo sviluppo di future strategie di mitigazione più efficaci, affidabili e trasferibili alle aziende zootecniche.

8. Disseminazione dei risultati

Nell'ambito delle attività di progetto, i risultati della ricerca sono stati diffusi sia all'interno della comunità scientifica internazionale sia presso gli operatori del settore agricolo, con l'obiettivo di favorire il trasferimento delle conoscenze e promuovere l'adozione di pratiche innovative per la gestione sostenibile degli effluenti zootecnici.

8.1. Divulgazione scientifica

I principali risultati del progetto sono stati presentati alla comunità scientifica internazionale attraverso il seguente contributo:

Gulinelli, M. M., Akther, K. R., Rollè, L., & Dinuccio, E. (2026**).** *Nitrogen Losses from Cattle Manure through Physical, Biological and Chemical Additives: Evidence from Laboratory Storage Trials.* Poster presented at the **Nitrogen Workshop 2026**, Sassari, Italy, 25–29 May 2026.

8.2. Attività di formazione tecnica in agricoltura

Le conoscenze sviluppate nell'ambito del progetto sono state inoltre trasferite agli operatori del settore agricolo attraverso attività di formazione tecnica organizzate da ENFIP Piemonte nell'ambito del Complemento per lo Sviluppo Rurale (CSR) Piemonte 2023–2027, Intervento SRH03 – *Formazione degli imprenditori agricoli e degli addetti alle imprese operanti nei settori agricoltura, zootecnia e alle microimprese operanti in zona rurale*. In particolare, nel periodo febbraio–marzo 2026, il Coordinatore scientifico del progetto ha partecipato come docente a tre edizioni del corso di formazione "Innovazioni nei sistemi colturali cerealicoli", organizzate nelle sedi di Candiolo (TO), Morozzo (CN) e Rocca de' Baldi (CN) e rivolte a imprenditori agricoli, tecnici e addetti delle aziende agricole e zootecniche. Ciascuna edizione ha coinvolto circa 10 partecipanti, favorendo un confronto diretto con gli operatori del settore sui temi della gestione sostenibile dei nutrienti, dell'agricoltura di precisione e dell'impiego efficiente dei fertilizzanti organici e minerali nei sistemi cerealicoli e cerealicolo-zootecnici. Le attività formative hanno rappresentato un'importante occasione di trasferimento delle conoscenze tecnico-scientifiche maturate nel progetto STREAL2 verso il

sistema produttivo regionale, favorendo il confronto diretto tra ricerca, consulenza tecnica e imprese agricole e contribuendo alla diffusione di pratiche innovative per la gestione sostenibile degli effluenti zootecnici.

8.3. Prodotti per la divulgazione

Tra gli obiettivi del Progetto STREAL2 c'è anche la selezione delle modalità gestionali dei reflui zootecnici palabili più efficaci dal punto di vista ambientale e al contempo sostenibili per le imprese agricole, nel rispetto del quadro normativo vigente. Al fine di divulgare tali buone pratiche agli operatori e ai tecnici del settore zootecnico, sono stati realizzati i seguenti prodotti divulgativi:

- un **articolo tecnico** destinato alla rivista *"Quaderni della Regione Piemonte – Agricoltura*" (Allegato A) che illustra le attività tecnico-scientifiche svolte, evidenziando i risultati maggiormente interessanti per le imprese agricole. La rivista ha una cadenza di pubblicazione annuale; l'articolo sarà inserito nel numero di ottobre 2026, ma sarà reso disponibile anche tramite la pagina web della rivista.
- un **opuscolo divulgativo** (Allegato B), destinato alla stampa cartacea per la distribuzione durante fiere, incontri tecnici e giornate in campo. La scelta di mettere a disposizione il materiale in formato cartaceo, volta a soddisfare la necessità di formazione/informazione della parte di mondo agricolo meno avvezza all'uso di strumenti tecnologici, verrà mitigata nel relativo impatto ambientale procedendo alla stampa delle copie - tramite il Centro Stampa regionale - solo in vista del singolo evento e previa quantificazione dello specifico fabbisogno di copie. L'opuscolo sarà comunque a disposizione per il download dal portale web regionale.
- **tre video-pillole** (story-board in Allegato C) destinate alla condivisione tramite i social istituzionali dei partner del progetto. Questa tipologia di prodotto divulgativo è pensata per soddisfare la necessità di formazione/informazione della quota di mondo agricolo maggiormente avvezza all'uso di strumenti tecnologici. Poichè la realizzazione delle video-pillole viene svolta da un soggetto esterno a Regione Piemonte, ad oggi sono disponibili gli storyboard dei tre filmati; non appena completato l'iter di affidamento del lavoro, saranno realizzate le video-pillole, che

poi il Settore regionale competente in materia di comunicazione provvederà a mettere a disposizione.

9. Bibliografia

1. Aguerre, M. J., Wattiaux, M. A., & Powell, J. M. (2012). Emissions of ammonia, nitrous oxide, methane, and carbon dioxide during storage of dairy cow manure as affected by dietary forage-to-concentrate ratio and crust formation. *Journal of Dairy Science*, 95(12), 7409-7416.
2. Amon, B., Kryvoruchko, V., Amon, T., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2006). Methane, nitrous oxide, and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 112*(2–3), 153–162.
3. ARPA Piemonte. (2021). *Inquinamento da particolato PM10: l'agricoltura*. https://www.arpa.piemonte.it/notizia/inquinamento-particolato-pm10-lagricoltura
4. Berg, L. (2012). SFP – More-than-Manure (MTM) nutrient manager. *National Hog Farmer*.
5. Cao, Y., Wang, X., Bai, Z., Chadwick, D., Misselbrook, T., Sommer, S. G., ... & Ma, L. (2019). Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, *235*, 626-635.
6. Chang, F., Fabian-Wheeler, E., Richard, T. L., & Hile, M. (2023). Compaction effects on greenhouse gas and ammonia emissions from solid dairy manure. *Journal of Environmental Management,* 332, 117399.
7. DIVAPRA, IPLA, ARPA (1998), *Metodi di analisi del compost*, Capitolo C7.2.
8. Duong, C. M., Wang, H., & Lim, T. T. (2021). Effectiveness of manure pit additive in reducing emissions and solids. *Applied Engineering in Agriculture, 37*(2), 309–317.
9. Guarino, M., Fabbri, C., Brambilla, M., Valli, L., & Navarotto, P. (2006). Evaluation of simplified covering systems to reduce gaseous emissions from livestock manure storage. *Transactions of the ASABE, 49*(3), 737–747.
10. Holly, M. A., & Larson, R. A. (2017). Effects of manure storage additives on manure composition and greenhouse gas and ammonia emissions. *Transactions of the ASABE, 60*(2), 449–456.
11. ISPRA. (2025). *Emissioni di ammoniaca dall'agricoltura*. Indicatori ambientali. https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/agricoltura/emissioni-di-ammoniaca-dallagricoltura
12. Lee, S. R., & Kim, G. (2024). Assessing Ammonia (NH_3) Emissions, Precursor Gas (SO2, NOx) Concentrations, and Source Contributions to Atmospheric PM2. 5 from a Commercial Manure Composting Facility. *Applied Sciences*, *14*(23), 11467.
13. McCrory, D. F., & Hobbs, P. J. (2001). Additives to Reduce Ammonia and Odor Emissions from Livestock Wastes: A Review. *Journal of Environmental Quality,* 30:345–355.
14. Petit, C., Kante, K., & Bandosz, T. J. (2010). The role of sulfur-containing groups in ammonia retention on activated carbons. *Carbon, 48*(3), 654–667.
15. Richard, T. L., Veeken, A. H. M., De Wilde, V., & Hamelers, H. V. M. (2004). Air-filled porosity and permeability relationships during solid-state fermentation. *Biotechnology Progres,,* 20(5), 1372–1381.
16. Sun, F., Harrison, J. H., Ndegwa, P. M., & Johnson, K. (2014). Effect of manure treatment on ammonia and greenhouse gas emissions following surface application. *Water, Air, & Soil Pollution, 225*(4), 1923.
17. Pagans, E., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere*, *62*(9), 1534-1542.

ALLEGATO A. Articolo tecnico

STREAL2: STrategie per la Riduzione delle Emissioni di Ammoniaca dal Letame.

Letame e ambiente: perché la gestione conta (box di approfondimento)

La gestione del letame è cruciale per la sostenibilità ambientale dei sistemi agro-zootecnici e durante il suo stoccaggio si verificano perdite di azoto come ammoniaca (NH_3), che peggiorano la qualità dell'aria e contribuiscono alla formazione indiretta di protossido di azoto (N_2O), potente gas serra. La perdita di azoto e fosforo favorisce l'eutrofizzazione delle acque e riduce il valore agronomico degli effluenti, limitando la chiusura dei cicli aziendali e la riduzione dei fertilizzanti di sintesi, la cui produzione è energivora e con elevate emissioni di anidride carbonica (CO_2).

Le emissioni di ammoniaca sono tra le principali pressioni ambientali del settore agro-zootecnico. Secondo ISPRA (2025), nel 2023 l'agricoltura ha generato il 91,4% delle emissioni nazionali di ammoniaca (349,23 kt), da gestione degli allevamenti (~54%) e spandimento degli effluenti (~15%). In Piemonte, secondo l'IREA (Inventario Regionale delle Emissioni in Atmosfera), l'85% delle emissioni agricole di ammoniaca deriva dalla filiera di gestione delle deiezioni animali, dalla stalla allo stoccaggio fino all'utilizzo in campo (ARPA, 2021).

Il progetto **STREAL2 – STrategie per la Riduzione delle Emissioni di Ammoniaca dal Letame**, un'iniziativa di collaborazione tra Università di Torino – DISAFA e Regione Piemonte, ha esplorato alcune possibili soluzioni tecniche per la buona gestione del letame, in coerenza con gli obiettivi del Piano Regionale di Qualità dell'Aria (PRQA) e del Piano Stralcio Agricoltura.

Perché il letame è un punto critico

Quando il letame prodotto nell'allevamento dei bovini viene stoccato in attesa di essere distribuito in campo come fertilizzante organico, l'azoto in esso contenuto va incontro a trasformazioni chimiche e biologiche che possono portare a una consistente dispersione di ammoniaca in atmosfera. Questo fenomeno rappresenta una perdita doppia: da un lato un potenziale impatto ambientale, dall'altro una perdita di valore sia agronomico che economico, perché l'azoto che si volatilizza come ammoniaca non è più disponibile per nutrire le colture. Ridurre il rischio di queste perdite significa quindi conciliare due esigenze che troppo spesso vengono percepite come in conflitto: la tutela dell'ambiente e la redditività dell'impresa agricola.

La fase di stoccaggio che precede la distribuzione in campo è stata individuata come uno dei momenti critici del ciclo di gestione dei reflui zootecnici palabili (cioè solidi o semisolidi, tipici degli allevamenti che usano lettiera). È proprio su questa fase, insieme a quella di stabulazione degli animali, che si è concentrato il lavoro del progetto STREAL2.

Dalla prima alla seconda fase: continuità e ampliamento

STREAL2 rappresenta la naturale prosecuzione del progetto STREAL, concluso nel 2025. In quella prima fase erano stati messi alla prova in condizioni di laboratorio diversi additivi (chimici, biologici ed enzimatici) applicati sia in fase di stabulazione che nello stoccaggio del letame bovino, con