

RASSEGNA ED ANALISI DELLE VARIABILI CHE INFLUENZANO LE EMISSIONI DI AMMONIACA DAL SETTORE ZOOTECNICO

Anna Gilia Collalto, Alessandro Marongiu, Elisabetta Angelino*

ARPA LOMBARDIA, U.O. Inventario delle Emissioni in Atmosfera, Milano.

Sommario

L'ammoniaca è un inquinante atmosferico, che porta all'acidificazione e all'eutrofizzazione del suolo e dell'acqua e contribuisce alla formazione di particolato atmosferico secondario. Secondo le stime attuali degli inventari delle emissioni nazionali e locali, gli allevamenti zootecnici e la fertilizzazione dei terreni costituiscono la principale sorgente di emissione di questo inquinante. La normativa finalizzata alla riduzione e controllo delle emissioni di ammoniaca interviene su più fronti: fissando limiti ed obiettivi di riduzione delle emissioni a livello nazionale e definendo degli standard di riferimento tecnologico per alcune tipologie di allevamenti zootecnici.

Nel presente studio, i fattori di emissione medi nazionali per l'ammoniaca, riferiti all'ultimo aggiornamento dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera (ISPRA, 2023), sono stati confrontati con i risultati ottenuti dal software di supporto alle decisioni e alle autorizzazioni a livello aziendale: BAT-tool Plus (CRPA, 2021), che risulta ampiamente utilizzato nell'ambito delle autorizzazioni integrate ambientali. Verificata quindi la compatibilità delle stime nazionali con quanto ottenibile a livello della singola azienda, utilizzando dati ottenuti da misure su scala mondiale e raccolti nel database DATAMAN, è stato possibile indagare la coerenza e l'allineamento dei fattori di emissione nazionali e delle simulazioni aziendali, in un contesto geograficamente molto più ampio.

Le analisi statistiche su dati misurati effettuate in questo studio confermano l'influenza che svariati fattori hanno sulle emissioni di ammoniaca dal comparto zootecnico, quali le variabili legate alle tecnologie degli allevamenti e di fertilizzazione, le caratteristiche chimiche e fisiche degli effluenti, i parametri meteorologici.

Parole chiave: *inquinamento atmosferico, ammoniaca, effluenti zootecnici, fattori di emissione.*

REVIEW AND ANALYSIS OF THE VARIABLES INFLUENCING AMMONIA EMISSIONS FROM LIVESTOCK

Abstract

Ammonia is an atmospheric pollutant that leads to the acidification and eutrophication of soil and water and contributes to the formation of secondary atmospheric particulate matter. According to the current estimates from national and local emission inventories, livestock and soil fertilization are the main sources of this pollutant. Legislation aimed at reducing and controlling ammonia emissions intervenes on several fronts: setting limits and emission reduction targets at the national level and defining technological reference standards for certain types of livestock.

In this study, the national average emission factors for ammonia, referred to the latest update of the national inventory of emissions into the atmosphere (IIR 2023), were compared with the results obtained from the decision support and authorization software at the farm level: BAT-tool Plus, which is widely used in the context of integrated environmental authorizations. BAT-tool Plus was used to process two emission scenarios, corresponding to a maximum (HE = high emissions) and a minimum emission (LE = low emissions) scenario. The HE scenario was obtained by always inserting high emission and low efficiency techniques, while the LE scenario was processed considering some of the best available techniques. The compatibility of national estimates with what can be obtained at the level of the single farm was here verified. Therefore, using data obtained from global scale measurements and collected in the DATAMAN database, it was possible to investigate the consistency and alignment of national emission factors and livestock simulations, in a much wider geographical context.

The statistical analyses on measured data carried out in this study confirm the influence that various factors, such as variables related to the level of technological

IdA



* Per contatti: Elisabetta Angelino, Via Ippolito Rosellini, 17, 20124, Milano. Tel 0269666721.

Ricevuto il 30-11-2023; Correzioni richieste il 15-12-2023; Accettazione finale il 10-1-2024

implementation, the chemical and physical characteristics of manure and some meteorological parameters, have on ammonia emissions from the livestock.

Regarding the housing stage, the variables that mostly affect ammonia emissions are linked to the amount of nitrogen (N) excreted by the animal and to other characteristics of the animal shelters, such as the flooring type and the ventilation system.

In reference to the storage, the presence of a cover on the slurry and the type of the cover itself are the variables that mostly affect ammonia emission rates.

Finally, broadcast is the most emissive spreading method; the action of the wind may affect ammonia emissions when the land distribution is not followed by any incorporation of manure into the soil. It would be useful in the future to investigate the concomitance and associated influence of other factors, such as the time of incorporation of manure into the soil and some chemical-physical parameters of soil.

Keywords: *air pollution, ammonia, manure management, emission factors.*

1. Introduzione

In Italia, così come in Europa, le emissioni di ammoniaca risultano legate principalmente all'agricoltura e, in particolare, agli stadi emissivi che caratterizzano gli allevamenti intensivi di bovini, suini e avicoli (ISPRAa,b, 2023; EEA/EMEP, 2019).

L'ammoniaca, insieme agli ossidi di azoto e di zolfo, contribuisce alla formazione del particolato secondario più fine ed alla eutrofizzazione ed acidificazione degli ecosistemi. Per questo, la riduzione delle emissioni di ammoniaca in atmosfera è oggetto di una specifica direttiva, nota anche come direttiva NEC – National Emission Ceilings, recepita in Italia con D.Lgs 81/2018 che introduce degli obiettivi di riduzione per diversi altri inquinanti.

Il manuale EEA/EMEP costituisce il documento di riferimento per le stime, nell'ambito degli inventari nazionali e locali, delle emissioni in atmosfera. Nel manuale EEA/EMEP si precisa come le emissioni in atmosfera possano essere stimate tramite algoritmi a differente livello di complessità, quest'ultimo definito come Tier. Il Tier 1 rappresenta la metodologia più semplice, impiegando dati statistici facilmente reperibili per descrivere l'intensità dei processi e fattori di emissione medi di default. Il Tier 2 prevede, invece, l'utilizzo di fattori di emissione più specifici, definiti sulla base della tipologia e delle condizioni dei processi per l'area in cui viene sviluppato l'inventario

delle emissioni. Nel Tier 3, il livello più complesso, le conoscenze scientifiche più aggiornate sono implementate in apposite procedure e modelli e ciò si traduce con un più alto livello di dettaglio che comporta una maggiore disaggregazione delle attività e lo sviluppo di modelli più sofisticati. La TFEIP (Task Force on Emission Inventories and Projections), costituita da esperti da tutta Europa, si occupa di armonizzare le metodologie di stima e reporting degli inventari redatti dagli Stati membri nell'ambito della Convenzione Internazionale per l'Inquinamento Transfrontaliero (CLRTAP) e di aggiornare le linee guida tecniche del manuale.

In Italia, nell'ambito dei tavoli tecnici nazionali di SNPA (Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Legge n. 132 del 2016) sono stati sviluppati diversi documenti di riferimento che declinano le linee guida internazionali nell'ambito nazionale (CTN_ACE, 2001; SNPA, 2016; De Lauretis et al., 2012).

Annualmente viene data la comunicazione delle stime dell'inventario nazionale delle emissioni, in accordo a quanto previsto nell'ambito della CLRTAP/UNECE e dei relativi Protocolli di riduzione delle emissioni e l'ultimo, IIR 2023, riferito al 2021 è stato pubblicato nel 2023 (ISPRA, 2023).

L'allegato VIII della parte seconda del D.Lgs 152/2006 e s.m.i., elencando gli ambiti di applicazione della normativa e ricalcando la direttiva 96/61/CE del 24 settembre 1996 sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento (IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control) e la direttiva 2010/75/UE (IED – Industrial Emissions Directive), considera nella voce "altre attività" anche gli allevamenti intensivi di pollame o suini, che comprendano un numero di posti superiore a determinate soglie (40.000 posti pollame, 2.000 posti suini dai 30 kg/capo in su, 750 posti scrofe). Nello stabilire le condizioni di autorizzazione per le installazioni di cui al capo II della direttiva 2010/75/UE, fungono da riferimento le conclusioni sulle BAT (BAT-C, 2017), dove sono anche forniti livelli di emissione associati alle migliori tecniche disponibili, i BAT-AEL.

Oltre che logico in termini concettuali, risulta utile a livello operativo distinguere, nell'ambito delle attività del settore zootecnico, diverse fasi, o stadi emissivi, come di seguito specificato:

1. stabulazione o ricovero degli animali;
2. stoccaggio degli effluenti;
3. spandimento o distribuzione in campo degli effluenti.

Già il BAT-tool Plus, applicativo sviluppato dal Centro Ricerche Produzioni Animali per il calcolo delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti intensivi di bovini, suini ed avicoli, (CRPA, 2021), calato nel

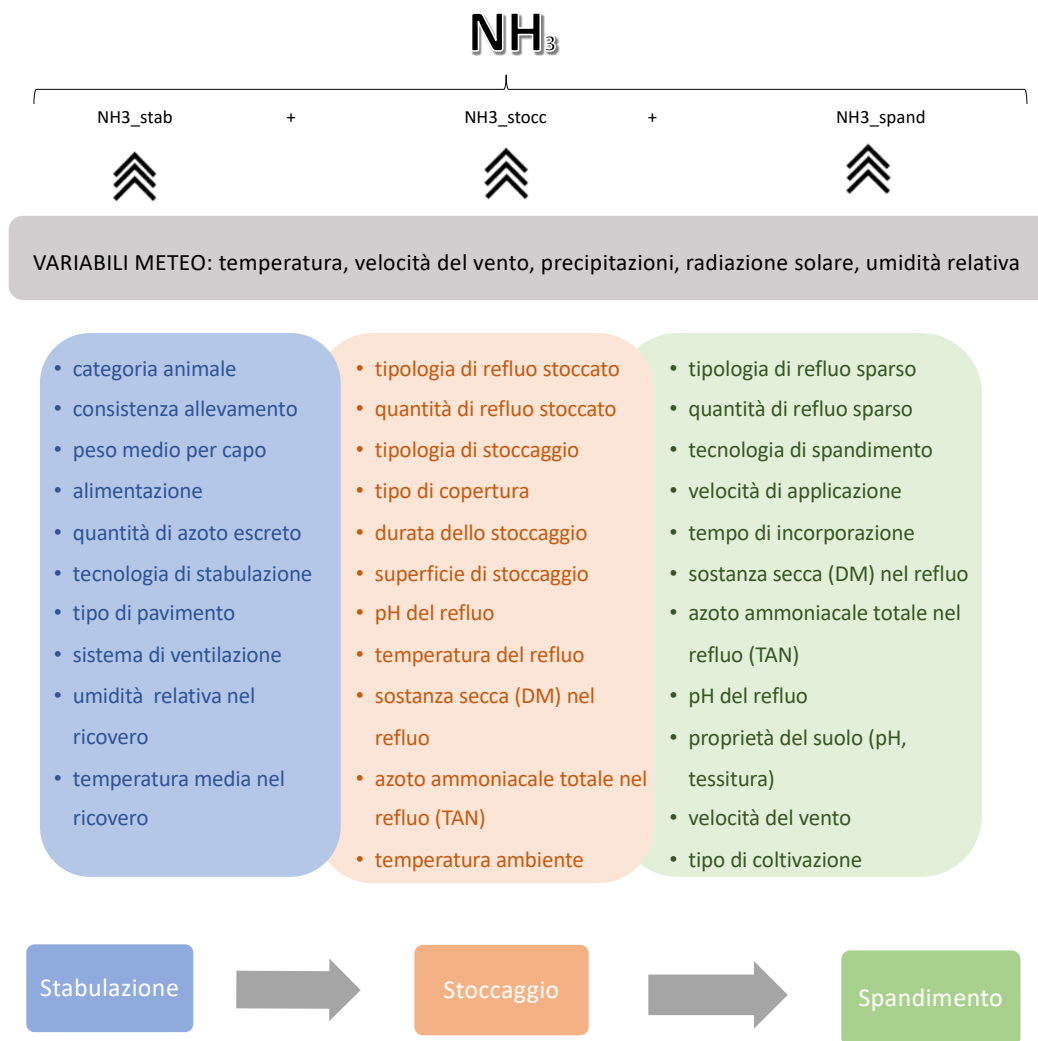


Figura 1. Variabili che influenzano le emissioni di NH₃ dagli allevamenti.

contesto aziendale, associa agli stadi di cui sopra diverse variabili che possono influire sulla portata delle emissioni di ammoniaca.

Con l'introduzione di dati misurati in differenti Paesi (fonte: DATAMAN), è stato possibile arricchire l'analisi e renderla statisticamente più robusta, ampliando il ventaglio di variabili e calando i confronti tra i fattori di emissione per l'ammoniaca in un contesto internazionale.

La figura 1 riporta l'elenco delle principali variabili, che influenzano le emissioni per ciascuna delle tre diverse fasi: stabulazione, stoccaggio, spandimento, oltre alle variabili meteorologiche, come la temperatura e la velocità del vento, che impattano, trasversalmente, sulle tre fasi.

2. Materiali e metodi

2.1. L'ammoniaca nell'inventario nazionale

Il rapporto sull'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera del 2023, IIR 2023, dedica il sesto capitolo all'agricoltura e stima le emissioni di ammoniaca

considerando la gestione degli animali nei ricoveri, lo stoccaggio degli effluenti e la distribuzione in campo degli stessi (ISPRA, 2023).

Il documento, nell'illustrare le fonti dei dati e le metodologie di calcolo alla base delle analisi condotte e dei risultati ottenuti, ricalca la struttura del manuale EEA/EMEP e fa riferimento al capitolo relativo alla gestione degli effluenti zootecnici (3B), secondo la classificazione NFR (Nomenclature For Reporting); pertanto, sulla base della categorizzazione degli animali lì presentata, si concentra sulle categorie delle vacche da latte (3.B.1.a), dei suini (3.B.3), delle galline ovaiole (3.B.4.g.i) e dei polli da carne (3.B.4.g.ii).

Presenta, inoltre, una disamina sull'evoluzione delle tecnologie di abbattimento delle emissioni di ammoniaca nel tempo, mostrando le differenze tra i fattori di emissione negli anni.

L'approccio metodologico-operativo che sottende alla stesura dell'IIR è allineato al manuale EEA/EMEP e alle Linee Guida dell'IPCC (EEA/EMEP, 2019; IPCC, 2019). La Tabella 1 riporta i fattori di emissione medi

Tabella 1. Fattori di emissione medi nazionali dell'ammoniaca dalla gestione degli effluenti zootecnici per il 2021.

NH ₃ [kg capo ⁻¹ anno ⁻¹]	Stabulazione	Stoccaggio	Spandimento
Vacche da latte	16,73	13,54	11,81
Altri suini	2,38	1,61	1,11
Scrofe	4,86	3,45	2,39
Galline ovaiole	0,13	0,05	0,04
Polli da carne	0,08	0,05	0,02

nazionali per l'ammoniaca (Tier 2) espressi in kg capo⁻¹ anno⁻¹, riferiti al 2021, relativamente alle categorie animali di seguito considerate: vacche da latte, suini, scrofe, galline ovaiole e polli da carne. Il fattore di emissione totale, per ciascuna delle categorie animali, è ripartito nei diversi stadi emissivi (IIR 2023).

2.2. Software per il calcolo delle emissioni aziendali

Realizzato nell'ambito del progetto LIFE PREPAIR, il BAT-tool Plus permette di calcolare le emissioni di NH₃ e di GHG su scala aziendale (CRPA, 2021).

Il tool, basato sulle metodologie di calcolo proprie del Tier 2, consente di stimare le emissioni provenienti dagli allevamenti intensivi di bovini, suini e avicoli e scompone il valore delle emissioni totali (kg anno⁻¹) nei contributi derivanti dai diversi stadi emissivi.

L'attività di applicazione del BAT-tool Plus si è articolata in due fasi:

1. elaborazione di due scenari emissivi, inserendo le caratteristiche per tre tipologie di allevamento (bovini, suini e avicoli) sotto descritte;
2. confronto tra i fattori di emissione ottenuti dalle simulazioni elaborate con il BAT-tool Plus e i fattori di emissione medi nazionali pubblicati nell'IIR 2023.

I due scenari emissivi corrispondono ad uno scenario di massima (HE) e di minima emissione (LE).

Lo scenario HE è stato ottenuto inserendo sempre tecniche ad alta emissione e bassa efficienza, mentre lo scenario LE è stato elaborato considerando alcune delle migliori tecniche disponibili presenti in BAT-tool Plus e derivanti dalle BAT-C e dal documento tecnico UNECE-TFRN (Task Force for Reactive Nitrogen).

Esistono a livello internazionale diversi software analoghi al BAT-tool Plus per presupposti concettuali, metodologie e tipo di risultati restituiti.

Tra questi, si possono citare: AgrEE tool, ALFAMI, Farm AC, Manure Management N-flow tool (TFEIP, 2023).

AgrEE tool (Agricultural Emission Estimation tool) nasce come strumento per calcolare le emissioni in atmosfera di inquinanti — ammoniaca, PM_{2,5}, PM₁₀, metalli pesanti, NO_x, metano, ecc. — che derivano dalle attività agricole. Il tool si basa sul manuale EEA/

EMEP e sulle Linee Guida dell'IPCC, utilizzando, come approccio principale per le stime, le metodologie di calcolo proprie del metodo Tier 2. Le tre sorgenti principali considerate nell'ambito di questo strumento sono le seguenti: allevamenti (che comprendono fermentazione enterica e gestione degli effluenti), emissioni da suoli agricoli e da combustione di stoppie.

ALFAMI (Ammonia Loss from Field-Applied Manure) nasce al fine di comprendere e prevedere le emissioni di ammoniaca derivanti dalla fase dello spandimento in campo del letame (Hafner et al., 2017). Il progetto si compone di un dataset di misure di emissioni da diversi Paesi che, con la versione aggiornata di ottobre 2022, ha iniziato ad includere anche i dati dell'Italia; si compone inoltre di un modello che stima le emissioni di ammoniaca dal letame applicato sul campo, in funzione della quantità, proprietà, gestione dello stesso e delle condizioni meteorologiche.

Sviluppato nell'ambito del progetto europeo Animal-Change, Farm AC (Farm Animal Change) è un modello flessibile e adattabile che simula i flussi di azoto e di carbonio ed utilizza le metodologie di calcolo proprie del Tier 2 relativamente alle emissioni dalla gestione degli effluenti zootecnici. Per ciò che concerne il bilancio di azoto, il tool, basandosi sul modello di flusso di N che occorre negli allevamenti, combina dati di input e di specifiche variabili che descrivono l'allevamento legato allo scenario di base; quindi, quantifica e restituisce le perdite di azoto riferite allo scenario ottenuto applicando tale modello di flusso allo scenario di base.

Il Manure Management N-flow tool, sviluppato da Aether UK (<https://aether-uk.com/>), possiede anch'esso un approccio basato sul Tier 2 ed è stato concepito al fine di calcolare le emissioni dei composti azotati da diverse sorgenti, che ricalcano l'organizzazione in capitoli delle attività di applicazione dei reflui e dei suoli del manuale EEA/EMEP.

2.3. DATAMAN: un database di misure di emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico

La principale raccolta di dati misurati sulle emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico si trova nel database DATAMAN, che nasce come progetto interna-

zionale con lo scopo di sviluppare e popolare un database sulle emissioni di NH_3 e GHG derivati dalla gestione degli effluenti zootecnici e, conseguentemente, per ridefinire i fattori di emissione per gli inventari nazionali (Beltran et al., 2021; Hassouna et al., 2022; van der Weerden et al., 2021; van der Weerden et al., 2023; Webb et al., 2021).

In analogia agli altri strumenti di calcolo come BAT-tool Plus, DATAMAN si articola in base a stadi emissivi ed inquinanti considerati. In termini operativi, infatti, all'interno del database DATAMAN è possibile fare riferimento a tre diversi dataset, uno relativo a ciascuna delle tre fasi di cui sopra: stabulazione, stoccaggio, spandimento.

Comune ai tre dataset è l'ampio ventaglio di variabili considerate (163 per la stabulazione, 146 per lo stoccaggio, 113 per lo spandimento), che è possibile suddividere in differenti categorie in base al tipo di informazioni ad esse associate. Infatti, le informazioni possono riferirsi, tra le altre cose, al Paese, alla zona climatica di appartenenza, alla specie chimica e ai dettagli riferiti alle misure, ai tassi di emissione, alle categorie di animali e alla descrizione delle stesse, ai fattori di emissione, a fattori di conversione e, infine, alle tecniche di stabulazione, stoccaggio e spandimento applicate.

Come riportato da Hassouna et al. (2022), la fase alla quale sono associati più dati è la stabulazione, mentre la specie più rappresentata è quella dei suini.

Uno degli obiettivi del presente studio era mettere a confronto i dati sulle emissioni derivati dal DATAMAN con quelli forniti nell'IIR 2023 e quelli delle simulazioni con il BAT-tool Plus. Per esigenze di confrontabilità, è stato quindi necessario uniformare le unità di misura dei fattori di emissione per l'ammoniaca forniti dal DATAMAN in modo che fossero rapportabili con l'unità di misura ($\text{kg NH}_3 \text{ capo}^{-1} \text{ anno}^{-1}$). Per fare ciò, sono state utilizzate le informazioni relative all'azoto escreto e all'azoto al campo, informazioni specifiche per ciascuna delle categorie di animali indagate. I valori dell'azoto escreto sono stati ricavati dalle tabelle del BAT-tool Plus, mentre i valori dell'azoto al campo dalla Tabella 2, Allegato I, del DM effluenti (Decreto n.5046, 2016).

2.4. Le variabili meteorologiche

Le emissioni di ammoniaca che derivano dai reflui degli allevamenti sono legate all'esposizione all'aria degli stessi. La modulazione temporale delle emissioni di ammoniaca in un modello di trasporto chimico dispersivo CTM (Chemical Transport Model) può essere stimata sulla base di variabili meteorologiche che mutano nel tempo, come riportato da diverse ricerche (Ambelas-SkjøTh et al., 2004; Gyldenkerne et al., 2005; Huang et al., 2012; Hutchings et al., 2021; Reis et al., 2011; Sutton et al., 2012).

Pertanto, è opportuno che tra i fattori che influenzano le emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico, vengano considerati anche alcuni parametri meteorologici, quali temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare. Tali fattori sono infatti in grado di influenzare la turbolenza nell'intorno della sorgente emissiva.

Tali parametri, per lo più, risultano influenzare non una singola fase, ma, con peso e modalità diversa, trasversalmente più fasi (figura 1).

Ad esempio, la temperatura e l'umidità relativa giocano un ruolo importante in tutte e tre gli stadi emissivi (stabulazione, stoccaggio e spandimento), poiché determinano la velocità e i tempi di reazione dell'ammoniaca in atmosfera. In questo studio, utilizzando le informazioni presenti in DATAMAN, i fattori di emissione per l'ammoniaca sono stati correlati con la temperatura media e l'umidità relativa registrate in alcuni ricoveri per animali per la fase di stabulazione.

Per le fasi di stoccaggio e spandimento in campo dei reflui, sono stati considerati gli effetti della temperatura ambiente e della velocità del vento.

3. Risultati e discussione

3.1. I fattori di emissione nazionali e aziendali nel panorama internazionale

Vengono riportati in forma grafica i risultati del confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca per le principali categorie di animali dalle tre fonti dei dati prese in esame: DATAMAN, BAT-tool Plus e IIR 2023. Rispettivamente le figure 2-a e 2-b riportano gli esiti di tali confronti per vacche da latte e suini in crescita, mentre le figure 3-a e 3-b quelli per galline ovaiole e polli da carne.

Relativamente al DATAMAN, si precisa che sono stati omessi dall'analisi i fattori di emissione negativi e dalla rappresentazione grafica gli outlier.

Per le vacche da latte è stato possibile, grazie ai dati disponibili, analizzare l'allineamento tra i fattori di emissione per l'ammoniaca afferenti alle tre fonti dei dati, per tutte e tre le fasi; mentre, per i suini in crescita e le due categorie di avicoli, lo spandimento è stato omesso. Infatti, per alcuni suini e per gli avicoli, il dataset di DATAMAN relativo allo spandimento, dispone ancora di pochi dati e/o di dati non differenziati per categoria animale.

Le figure 2 e 3 sono strutturate nel seguente modo: i boxplot grigi, relativi ai dati di DATAMAN, fotografano l'ampia variabilità dei fattori di emissione per l'ammoniaca nel panorama internazionale, all'interno del quale si collocano i dati italiani per il 2021, elaborati da ISPRA nell'IIR 2023 (triangolo nero vuoto nelle figure). Contestualmente, sono anche riportati i fattori

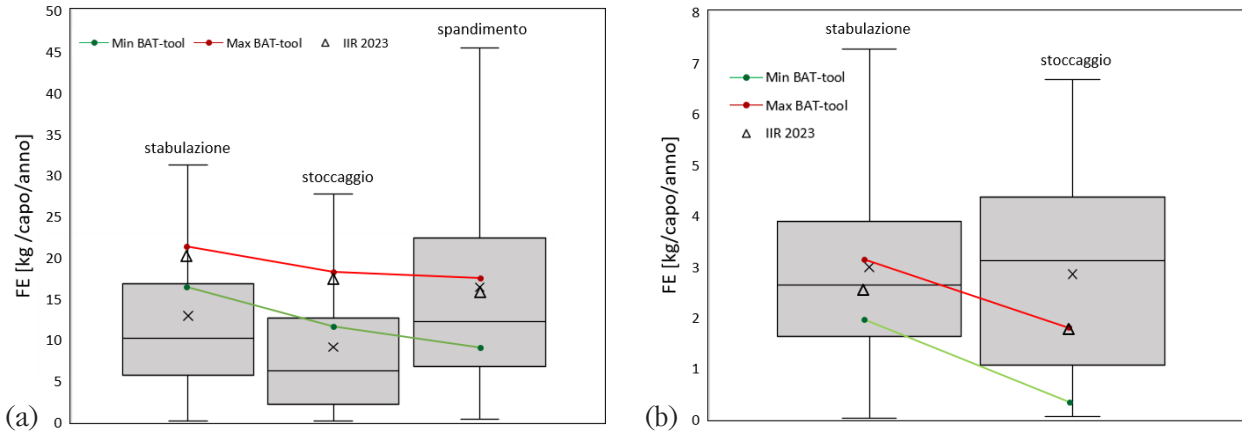


Figura 2. Confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (IIR 2023, scenari HE e LE dal BAT-tool Plus e range delle misure del DATAMAN): (a) Vacche da latte; (b) Suini in crescita.

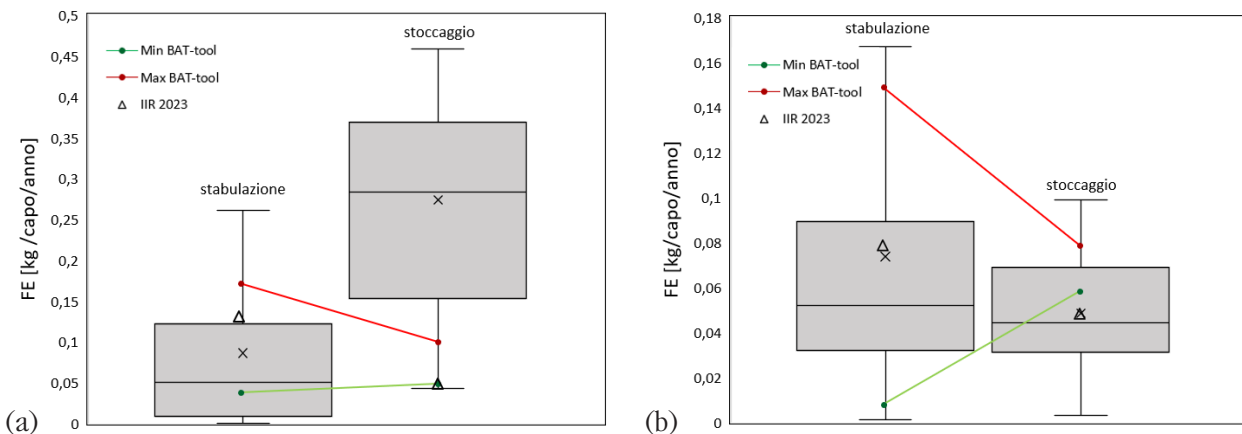


Figura 3. Confronto tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (IIR 2023, scenari HE e LE dal BAT-tool Plus e range delle misure del DATAMAN): (a) Galline ovaiole; (b) Polli da carne.

di emissione per l'ammoniaca ottenuti dall'elaborazione con BAT-tool Plus dei due scenari: HE (in figura, max BAT-tool) e LE (in figura, min BAT-tool), come spiegato nel paragrafo 2.2.

I fattori di emissione nazionali si collocano, quasi per tutti i casi illustrati, all'interno dell'intervallo minimo-massimo elaborato con BAT-tool Plus.

3.2. Le variabili che influenzano le emissioni di ammoniaca

Seguono la descrizione e gli esiti dell'attività svolta nel presente studio di analisi della correlazione tra diverse variabili: meteorologiche, tecnologiche, chimico-fisiche dell'effluente, considerando le differenti fasi di gestione dei reflui. Dove possibile, i fattori di emissione misurati in DATAMAN, sono stati confrontati con i coefficienti di riduzione percentuale delle emissioni riportati nelle tabelle di BAT-tool Plus.

3.2.1. Stabulazione

Effettuando un'analisi su tutto il dataset della stabulazione all'interno di DATAMAN, relativamente alle emissioni di ammoniaca, è stata ottenuta un'ottima correlazione tra il peso degli animali e il dato dell'azoto escreto (figura 4-a).

Esiste ed è positiva anche la correlazione tra il dato dell'azoto escreto e il tasso di emissione per l'ammoniaca, espresso come $\text{g N capo}^{-1} \text{giorno}^{-1}$, sullo stesso dataset riferito alla stabulazione (figura 4-b).

La scelta di rappresentare queste specifiche dipendenze si deve a diverse motivazioni:

- allineamento con la letteratura esistente;
- bontà della correlazione (figura 4-a);
- dispersione interessante per approfondimenti (figura 4-b);
- disponibilità di dati in DATAMAN.

Tuttavia, il valore di R^2 minore nel caso della correlazione tra azoto escreto e tasso emissivo e la dispersione

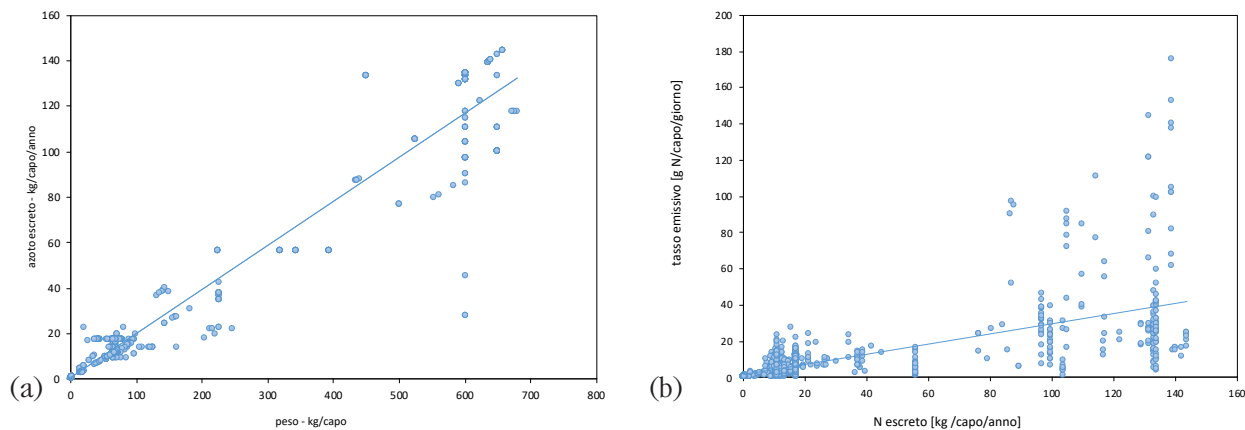


Figura 4. Grafici di dispersione che mostrano (a) la correlazione tra il peso degli animali e il valore dell'azoto escreto e (b) la correlazione tra l'azoto escreto e il tasso di emissione.

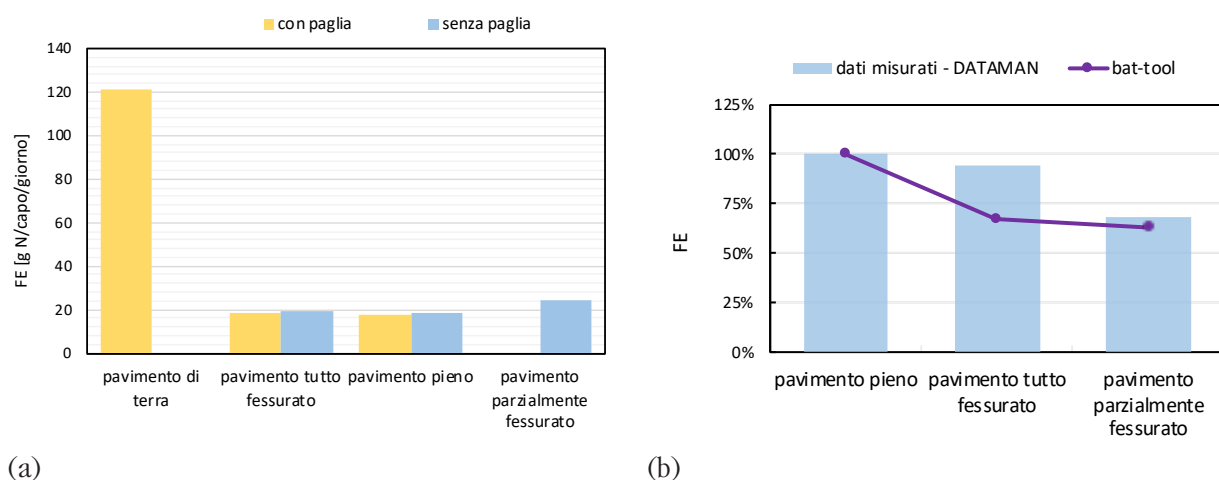


Figura 5. Confronto tra tipologie di pavimenti per (a) vacche da latte e (b) suini in crescita e influenza sui fattori di emissione per l'ammoniacca.

dei punti, che mostra come ad uno stesso valore di azoto escreto corrispondano più valori di emissione, hanno reso necessario considerare la concomitanza e l'influenza di ulteriori variabili legate alla tecnica di stabulazione. Pertanto, sono state considerate anche altre variabili, relative, ad esempio, al tipo di pavimentazione e alla tipologia di ventilazione nei ricoveri degli animali.

L'analisi, condotta per vacche da latte, suini in crescita e avicoli, conferma quanto riportato nella principale documentazione tecnica: l'AGD, ossia il documento dell'UNECE Ammonia Guidance Document (Bittman et al., 2014) e le BAT-C, ossia le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili, in ambito zootecnico (Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302).

La figura 5-a mostra che, in relazione alle vacche da latte, i tassi emissivi più alti sono legati alla pavimentazione con paglia.

In relazione ai suini, in figura 5-b, le emissioni derivate dai dati di letteratura, ossia dalle misure speri-

mentali raccolte in DATAMAN diminuiscono con pavimento totalmente e parzialmente fessurato rispetto al pavimento pieno. I fattori di emissione (FE), espressi come percentuale in ordinata, sono stati ottenuti rapportando i valori di emissione associati ai diversi pavimenti, rappresentati in ascissa, al valore più alto (quindi, in questo caso, il FE ottenuto col pavimento pieno). Figura 5-b riporta anche la variazione dei fattori di emissione rispetto alle stesse tipologie di pavimentazione, ottenuti da BAT-tool Plus.

I grafici in figura 6, relativamente alla modalità di ricircolo dell'aria nei ricoveri di vacche da latte e suini (a) e polli da carne (b), confermano che la ventilazione naturale è la tecnologia più emissiva, con riferimento sia ai dati misurati in DATAMAN (a), che ai coefficienti riportati in BAT-tool Plus (b), secondo le modalità descritte per figura 5-b.

Sono state considerate, congiuntamente a questi aspetti, anche la temperatura e l'umidità relativa.

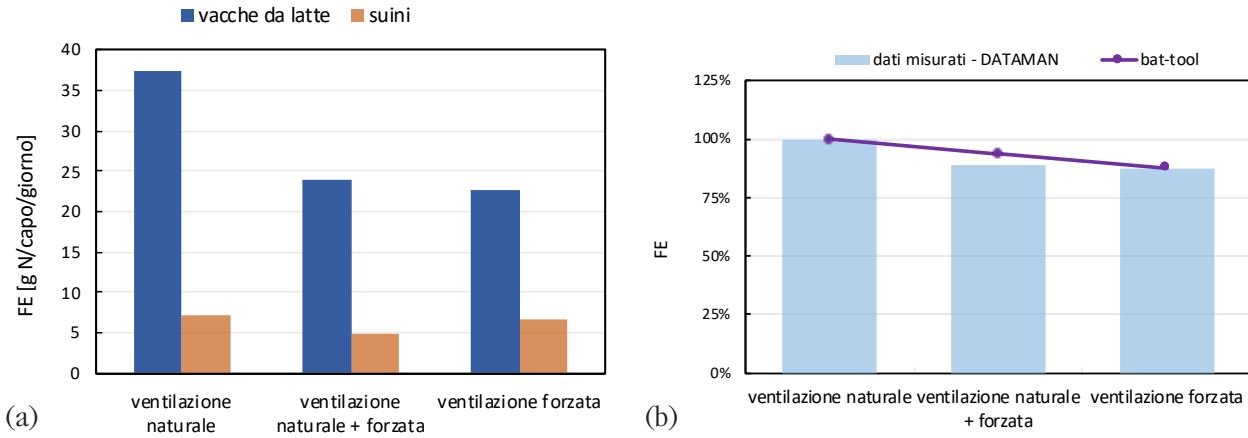


Figura 6. Confronto tra modalità di ricircolo dell'aria (a) nei ricoveri di vacche da latte e suini e (b) nella stabulazione degli avicoli e influenza sui fattori di emissione [FE] per l'ammoniaca.

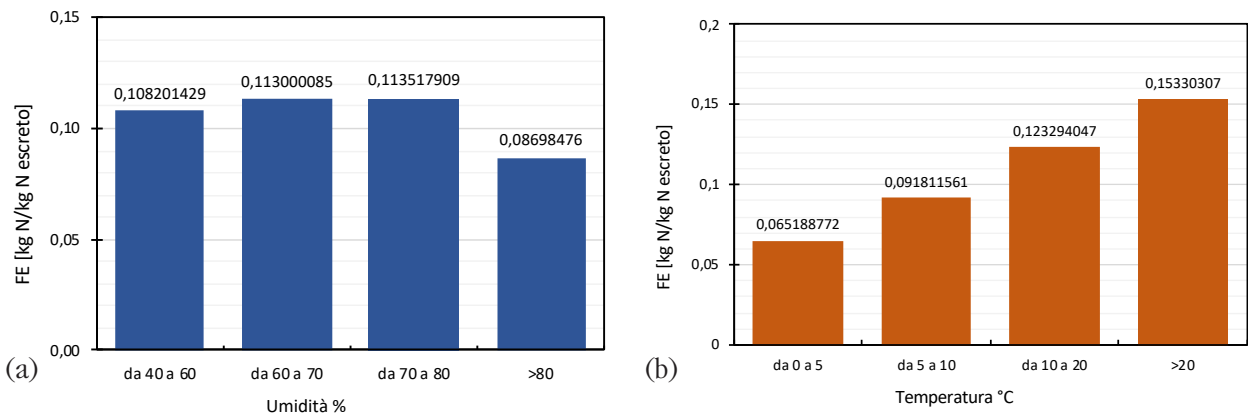


Figura 7. Istogrammi che mostrano, per dati misurati – fonte: DATAMAN – i valori medi dei fattori di emissione [FE] di ammoniaca associati a specifici range di (a) umidità e (b) di temperatura.

In figura 7-b si mostra come, all'aumentare della temperatura registrata nei ricoveri degli animali, si incrementano anche i fattori di emissione di ammoniaca [FE]. Invece, la relazione tra umidità relativa e fattori di emissione [FE], in figura 7-a, non sembra mostrare un andamento lineare.

3.2.2. Stoccaggio

Come suggerito da Hassouna et al. (2023), sono state indagate le relazioni tra tipologia di stoccaggio (in particolare il tipo di copertura) ed emissioni di ammoniaca. A partire dalle misure raccolte nel dataset relativo allo stoccaggio presenti in DATAMAN, figura 8 riporta le emissioni di ammoniaca derivate da liquami di suini e di vacche da latte, considerando le possibili modalità di copertura. Maggiori dettagli sui fattori di emissione medi associati a tutte le diverse tipologie di copertura registrate nel database sono forniti in Tabella MS1 (materiale supplementare).

In assenza di copertura sui liquami stoccati, i fattori di emissione, espressi in kg di azoto rispetto ai kg di azoto stoccato, sono i maggiori, seguiti da quelli associati alla copertura con crosta naturale. La copertura rigida e la copertura flessibile si configurano come le tecniche di stoccaggio più efficienti.

Figura 9 è strutturata come figura 5-b: in ordinata sono riportati i FE (%) da stoccaggio dei liquami derivati dai dati misurati raccolti in DATAMAN e rapportati al valore più alto, e i FE associati alle medesime tipologie di copertura, in ascissa, ottenuti da BAT-tool Plus.

È stata indagata anche la correlazione tra il fattore di emissione di ammoniaca e il pH dei liquami di bovini e suini all'inizio dello stoccaggio, sempre a partire dai dati misurati e raccolti in DATAMAN. Considerando due tipologie di stoccaggio, ovvero quella in lagone e quella in serbatoio, e non contemplando per gli effluenti alcun tipo di trattamento, è stato possibile osservare un rapporto di proporzionalità diretta

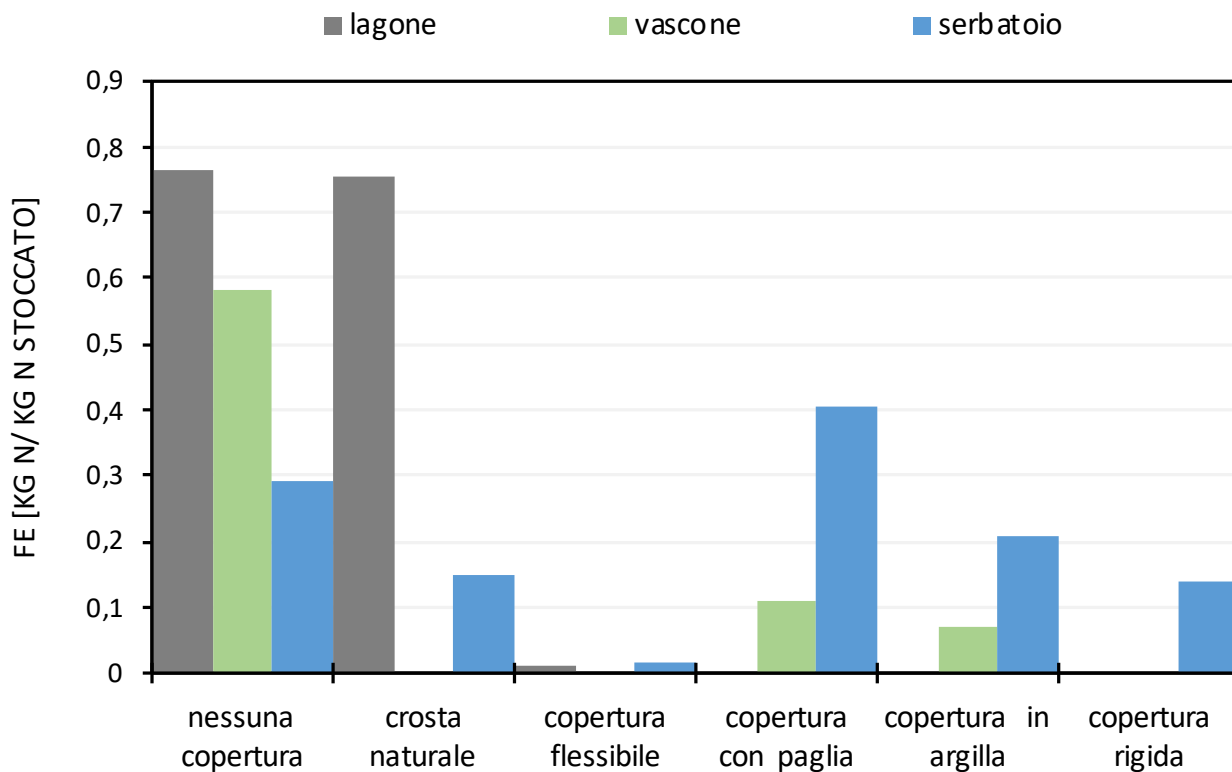


Figura 8. Fattori di emissione [FE] per l'ammoniaca ottenuti dalle misure raccolte in DATAMAN, in funzione delle principali tecniche per lo stoccaggio dei liquami, in legenda, e diversi tipi di copertura.

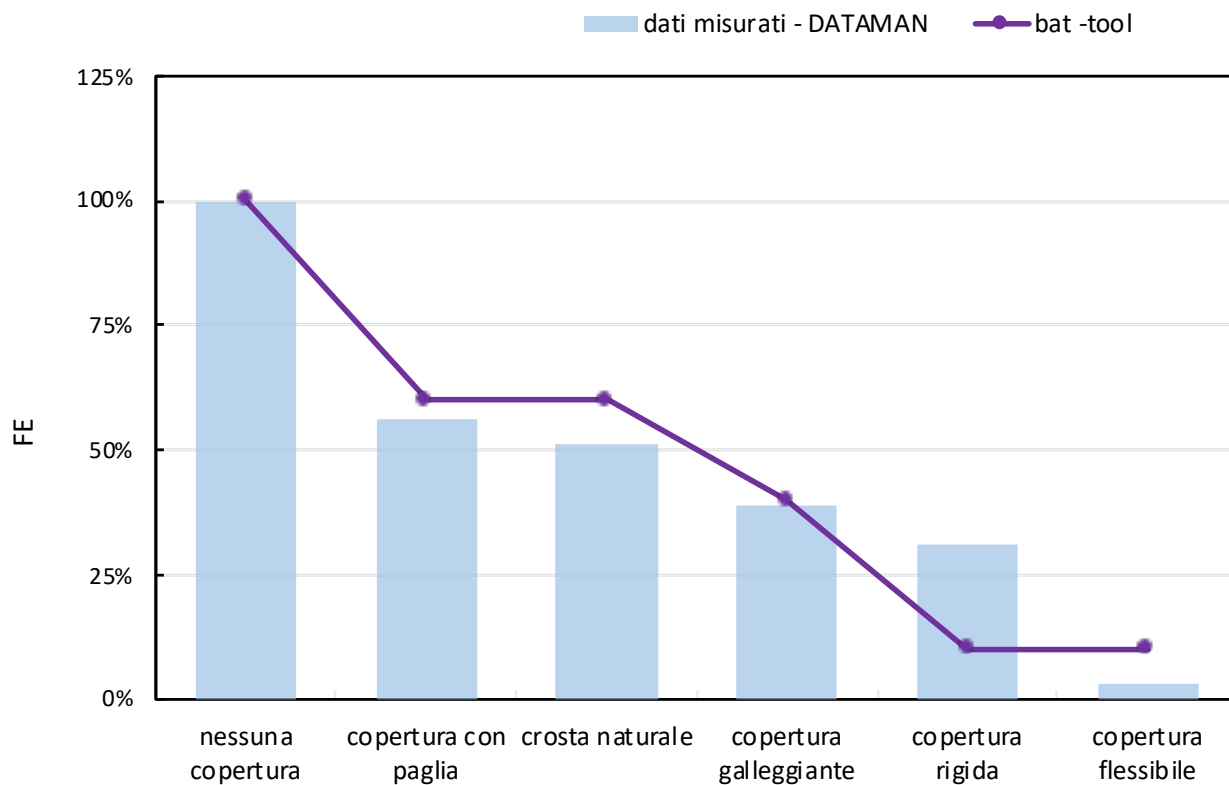


Figura 9. Confronto tra diverse tipologie di copertura nello stoccaggio dei liquami e influenza sui fattori di emissione per l'ammoniaca.

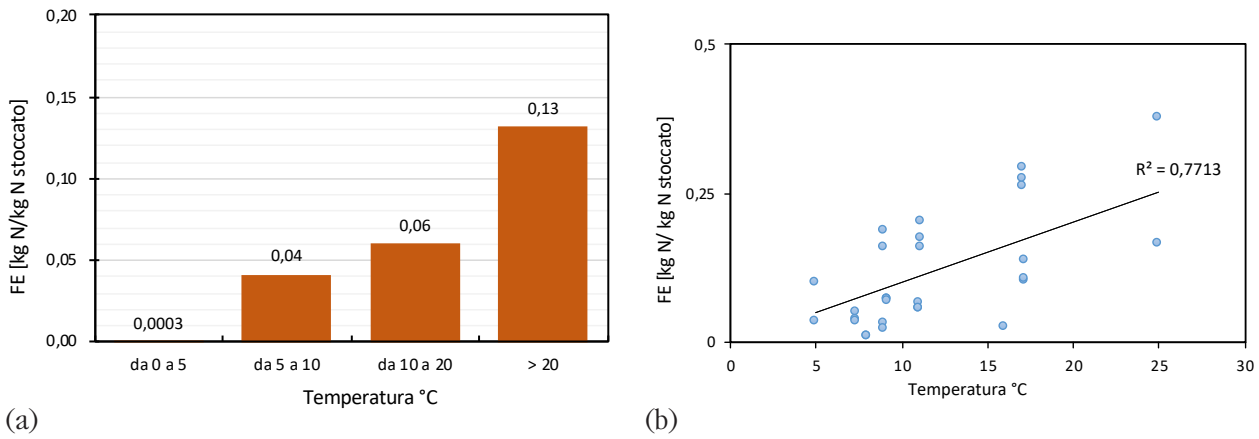


Figura 10. (a) Valori medi dei fattori di emissione [FE] di ammoniaca in funzione della temperatura e (b) correlazione tra la temperatura e le emissioni di ammoniaca.

($R^2 = 0,6$ calcolato rispetto all'intercetta) tra pH ed emissioni di ammoniaca: maggiore è il pH di partenza dei liquami e maggiori sono le emissioni misurate di ammoniaca (figura MS2). Tale aspetto trova riscontro nelle BAT-C, dove l'acidificazione dei liquami, ovvero l'abbassamento del pH, viene elencata tra le tecniche per abbattere le emissioni di ammoniaca dalla fase di stoccaggio degli effluenti.

Come per la stabulazione, anche per lo stoccaggio, completano l'analisi le variabili meteo, quali umidità, temperatura, radiazione solare e velocità del vento

Grazie ai dati misurati disponibili in DATAMAN, è stato possibile evidenziare una correlazione positiva tra il fattore di emissione per l'ammoniaca, espresso in $\text{kg N kg N stoccato}^{-1}$, e la temperatura, considerando solo i liquami senza copertura, che non abbiano subito alcun trattamento (figura 10).

In questo studio non è stato possibile considerare allo stesso modo l'influenza del vento, a causa della mancanza dei corrispondenti dati di velocità del vento rispetto ai valori di emissione.

3.2.3. Spandimento

Secondo un recente studio (van der Weerden et al., 2023), è possibile identificare tre principali fattori che influenzano le emissioni di ammoniaca durante lo spandimento di liquami bovini e suini, come di seguito riportato:

- contenuto di sostanza secca (DM);
- azoto ammoniacale totale (TAN);
- tecnica di applicazione dei reflui in campo.

Analizzando i dati misurati presenti in DATAMAN qualitativamente è possibile confermare che ai liquami siano associate emissioni relativamente più alte che non al letame solido palabile. Si può trovare riscontro di ciò anche nelle tabelle del BAT-tool Plus, dove i fattori di emissione associati alla distribuzione in campo dei solidi e dei liquidi per i bovini sono

Tabella 2. Correlazione tra TAN e DM con il fattore di emissione per l'ammoniaca dalla fase di spandimento a tutto campo.

Suini	FE ~ TAN	0,72
	FE ~ DM	0,72
Bovini	FE ~ TAN	0,77
	FE ~ DM	0,73

rispettivamente del 10 e del 20 % dell'azoto presente nel refluo.

Analizzando le stesse misurazioni raccolte in DATAMAN, inoltre, i fattori di emissione dell'ammoniaca, quando è stata considerata la tecnica di spandimento a tutto campo, sono risultati direttamente proporzionali alla concentrazione dell'azoto ammoniacale totale (TAN) e alla percentuale di sostanza secca (DM) dei liquami. Come è ragionevole ipotizzare, alte concentrazioni di TAN determinano un aumento delle emissioni. L'ulteriore osservazione riguarda il rapporto tra le emissioni di ammoniaca e il contenuto di DM nei liquami. Un aumento della sostanza secca ridurrà il tasso di infiltrazione nel terreno, allungando così la durata dell'esposizione dei reflui all'aria, cosa che a sua volta contribuirà alle emissioni (van der Weerden et al., 2023). La Tabella 2 riassume gli esiti dell'analisi di correlazione, calcolata rispetto alla intercetta, tra i fattori di emissione dell'ammoniaca (FE) dallo spandimento a tutto campo dei liquami di suini e di bovini, con TAN e DM. Nella elaborazione non sono stati considerati i valori negativi dei fattori di emissione e quelli che ricadevano nel 99-percentile più alto dei dati.

Figura 11 mostra per tutte le categorie di animali presenti in DATAMAN, ed in riferimento esclusivamente ai liquami, che lo spargimento a tutto campo senza interrimento è la tecnica più emissiva, seguita dalle due differenti modalità di spandimento a bande. Sempre in figura 11, analogamente alle figure 5-b, 6-b e

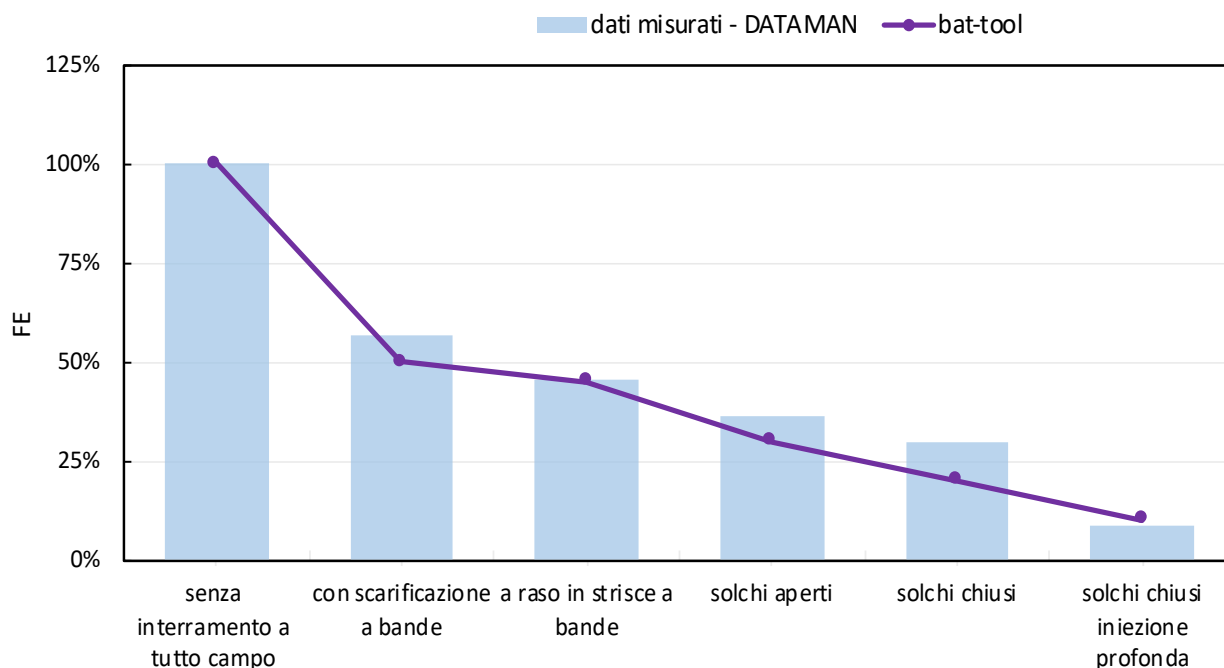


Figura 11. Influenza della tecnica di spandimento sulle emissioni di ammoniaca.

9, è riportato il confronto con i coefficienti tecnologici impiegati nel BAT-tool Plus. Si precisa che lo spandimento a bande con scarificazione è stato considerato, sulla base dei dati misurati disponibili in DATAMAN, non contemplando alcuna incorporazione degli effluenti nel terreno, a differenza delle modalità di distribuzione rimanenti: a raso in strisce, solchi aperti e solchi chiusi. Anche in relazione alla fase dello spandimento, completa l'analisi la valutazione del peso che hanno le variabili meteorologiche.

A determinate condizioni, la correlazione tra la velocità del vento (m s^{-1}) e le emissioni di ammoniaca ($\text{kg N kg N applicato al campo}^{-1}$) risulta positiva e il corrispondente valore del coefficiente R^2 calcolato rispetto all'intercetta elevato (figura 12-a). Sono stati omessi dall'analisi i valori negativi di emissione e quelli ricadenti nel 99-percentile più alto; è stata

presa in esame la sola modalità di distribuzione degli effluenti a tutto campo e, infine, come tipologia di effluenti, sono stati considerati i solidi palabili, i liquami e la lettiera avicola.

Inoltre, può essere utile considerare anche la variabile relativa al pH del suolo. In questo studio, a partire dai dati misurati nel DATAMAN, il fattore di emissione per l'ammoniaca è stato considerato in relazione al pH del suolo. Il grafico di dispersione riportato in figura 12-b mostra come esiste ed è positiva la correlazione tra le due variabili in gioco (R^2 rispetto all'intercetta = 0,77). L'analisi è stata condotta per i liquami applicati a tutto campo senza interrimento, omettendo i valori negativi e quelli ricadenti nel 99-percentile più alto.

Tuttavia, la dispersione dei dati rispetto alla retta di correlazione appare significativa in entrambi i grafici. Ciò suggerisce la necessità di considerare le variabili

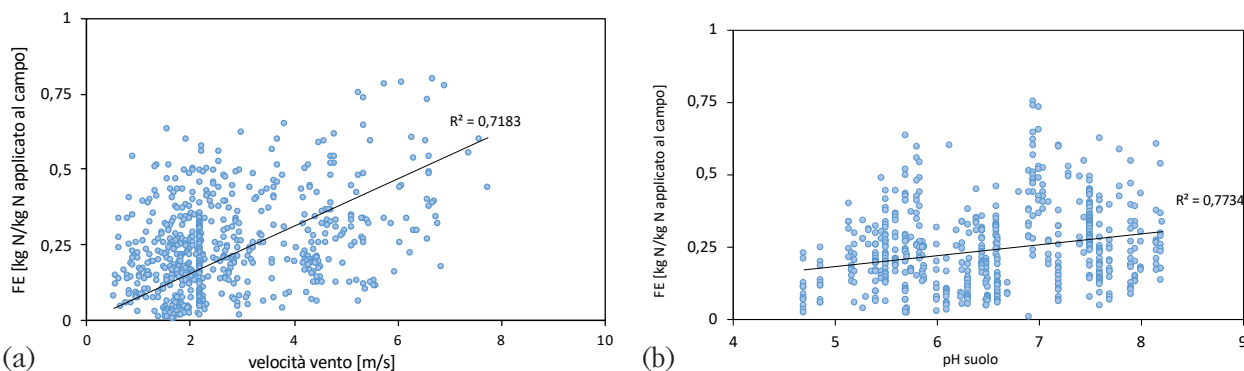


Figura 12. Correlazione tra emissioni di ammoniaca e (a) velocità del vento e (b) pH del suolo

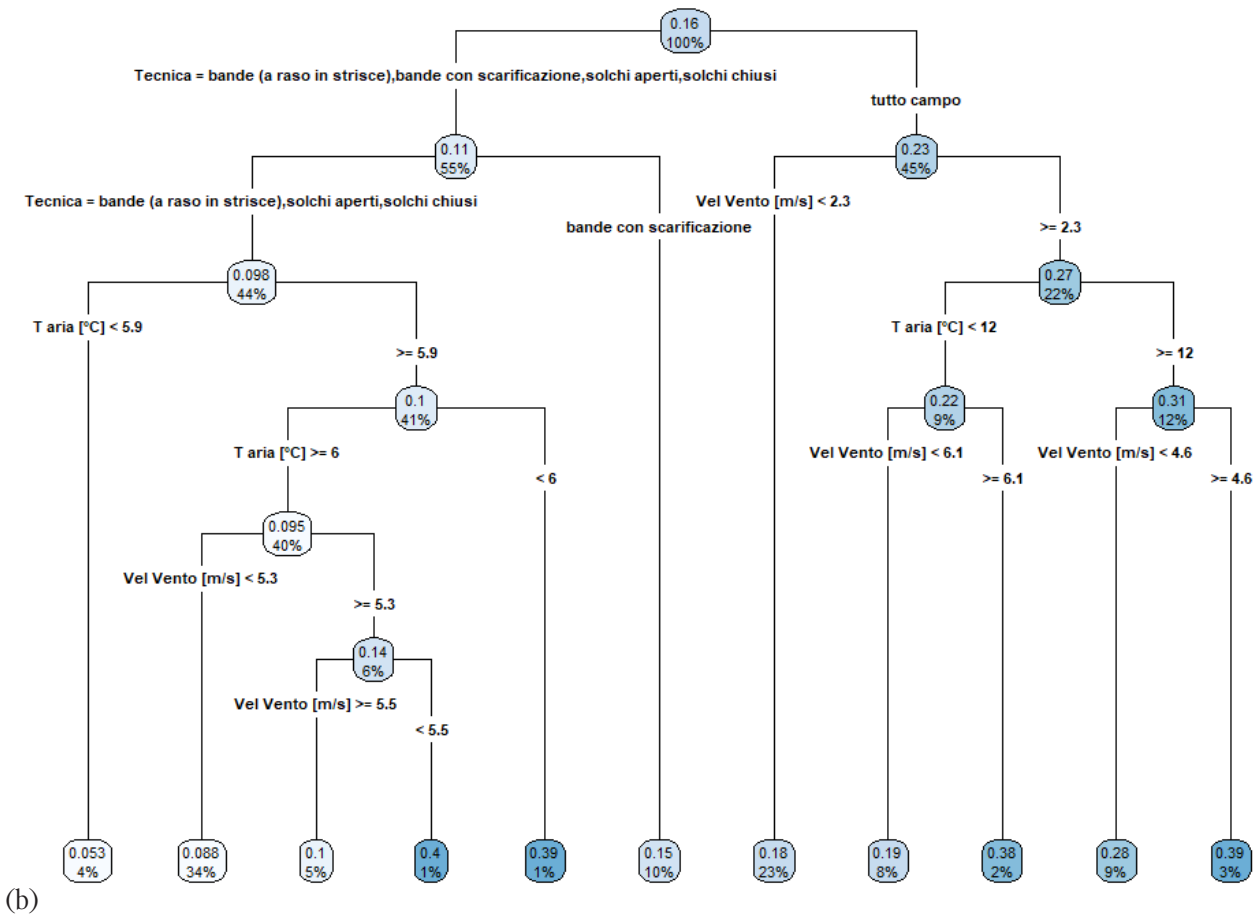
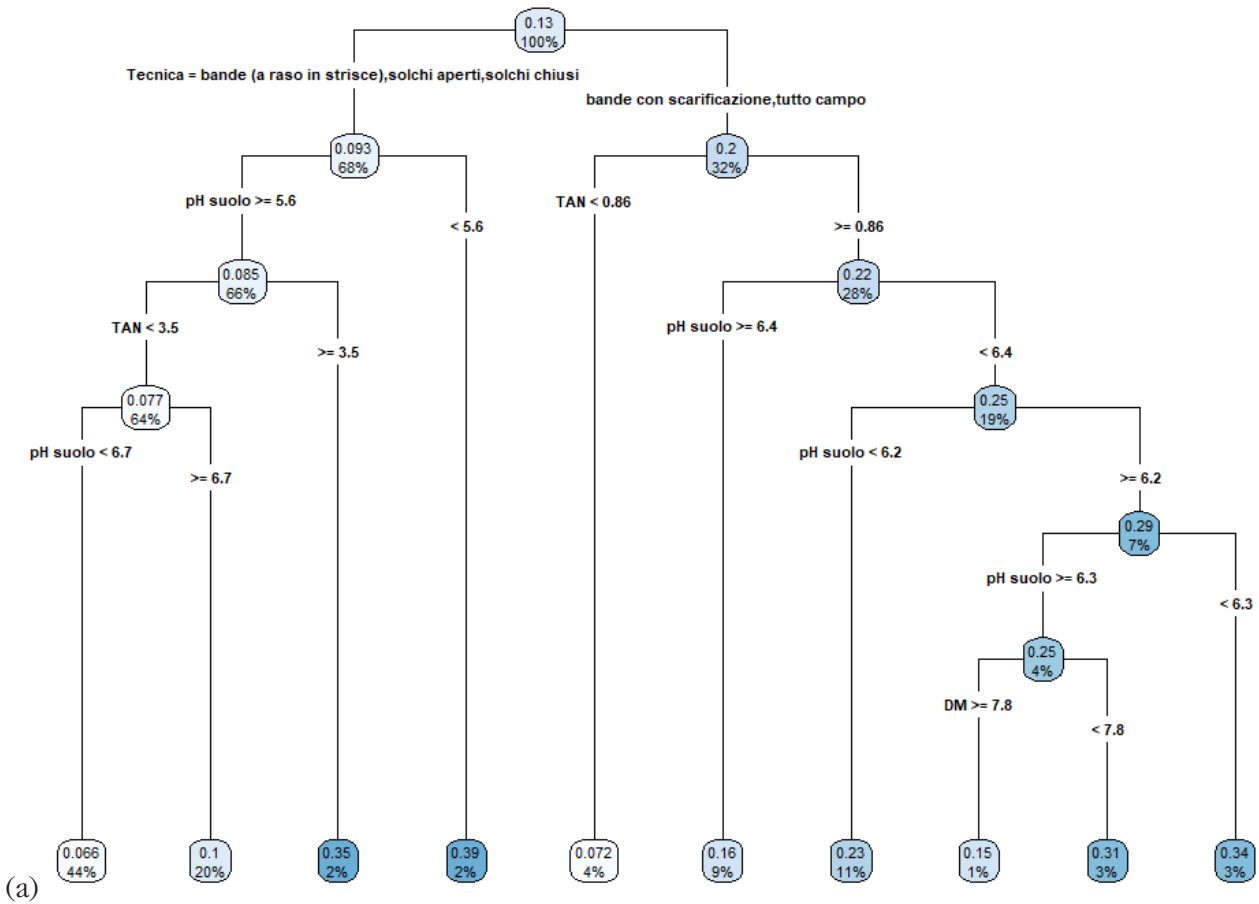


Figura 13. Alberi di regressione per le variabili nello spandimento dei reflui. a) Valutazione su tutte le possibili variabili, b) Valutazione considerando tecnica e parametri meteorologici medi.

in gioco contemporaneamente, in una analisi di regressione multipla, come riportato in figura 13.

Gli alberi di classificazione e regressione sono stati ottenuti utilizzando la libreria “rpart” (<https://cran.r-project.org/package=rpart>) nel software statistico R (versione 4.0.3) – RStudio (2023.06.1). Maggiori approfondimenti sull’influenza delle variabili meteorologiche sono riportati in un recente lavoro (Marongiu et al., 2023). I due alberi riportati in figura 13 mostrano che la scelta di una o dell’altra tecnologia di spandimento è il primo discriminante sulle emissioni di ammoniaca da questa fase.

Figura 13-a individua due gruppi separati di tecniche come primo livello di ramificazione: spandimento a tutto campo e a bande con scarificazione da una parte, e spandimento a raso in strisce, solchi aperti e solchi chiusi dall’altra. Quindi, per le tecnologie più emissive (sulla destra dell’albero), il TAN viene riconosciuto come primo attributo sulla base del quale effettuare una partizione, visto che crea una ramificazione rispetto al valore di 0,86; mentre per le altre tecniche (sulla sinistra dell’albero), incide innanzitutto il pH del suolo, e poi il TAN a pH maggiori.

L’albero in figura 13-b riporta un secondo livello di approfondimento e considera la relazione tra le emissioni di ammoniaca e le sole variabili meteorologiche. Sulla destra dello schema è presentata l’analisi per la tecnologia più emissiva, lo spandimento a tutto campo, mentre sulla sinistra vengono raggruppate tutte le altre modalità. Quando gli effluenti vengono applicati a tutto campo, velocità del vento maggiori determinano fattori di emissione più alti. A tale livello di ramificazione, l’attributo su cui effettuare una divisione è la temperatura ambiente, che, incrementando, porta

a fattori di emissione ancora più alti. D’altro canto, la velocità del vento non ha la stessa importanza quando i reflui vengono applicati in campo mediante tecniche meno emissive quali lo spandimento a bande con scarificazione o a raso in strisce, oppure a solchi, per cui il tempo di esposizione all’aria del refluo è minore.

4. Conclusioni

Prendendo in considerazione quanto disponibile ad oggi nella bibliografia di settore, questo lavoro è stato condotto con l’obiettivo di verificare l’allineamento di dati sulle emissioni di ammoniaca dal settore zootecnico afferenti a fonti di natura diversa. Nello specifico, sono stati considerati:

- i dati nazionali di sintesi contenuti nell’ultimo aggiornamento dell’inventario nazionale delle emissioni in atmosfera;
- i dati legati alle simulazioni di scenario elaborate con il BAT-tool Plus;
- i dati derivanti da misure sperimentali condotte in varie parti del mondo, raccolti in DATAMAN.

Potendo dunque contare, da un lato su un database così ricco e geograficamente esteso e dall’altro, sul dettaglio e sul livello di precisione garantiti dal BAT-tool Plus, è stata poi condotta un’analisi quantitativa, oltre che descrittiva, sulle variabili che possono influenzare le emissioni di ammoniaca nei tre stadi principali che avvengono negli allevamenti di bovini, suini e avicoli.

In questo studio, relativamente alla fase di stabilizzazione, si conferma che la quantità di azoto escreto dall’animale, che può dipendere dal peso dello stesso e dalla dieta, ha una significativa influenza sulle emissioni di ammoniaca pur non essendo l’unica variabile.



Infatti, anche le caratteristiche del ricovero, quali, ad esempio, la tipologia di pavimentazione e la modalità di ricircolo dell'aria, possono giocare un ruolo importante sulle emissioni. Ad esempio, per i suini, i pavimenti totalmente o parzialmente fessurati parrebbero più efficienti dei pavimenti pieni. Una ventilazione meccanica nei ricoveri sembrerebbe determinare minori emissioni.

In riferimento allo stoccaggio, la presenza (o l'assenza) di una copertura sui liquami e il tipo di materiale della stessa, sono le variabili che incidono maggiormente sulle emissioni. In diversi casi, i coefficienti di abbattimento forniti dal BAT-tool Plus (cfr. figure 5-b, 6-b, 9 e 11) sembrano essere confermati dalle elaborazioni sulle misure delle emissioni di ammoniaca raccolte nel database DATAMAN.

Le principali tecniche di trattamento dei reflui, che possono avere effetti sulla riduzione delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti, sono descritte nelle BAT-C: separazione meccanica, digestione anaerobica, tunnel esterno, digestione aerobica, nitrificazione-denitrificazione e compostaggio. Il BAT-tool Plus contempla la possibilità di valutare gli effetti del trattamento sulle emissioni. Il DATAMAN, pur non dedicando a questa fase un dataset separato, considera il trattamento degli effluenti tra le variabili nelle fasi di stoccaggio e di spandimento. Futuri approfondimenti sul tema potranno valutare l'influenza dei trattamenti sulle emissioni totali di ammoniaca da un allevamento, considerando, in maniera integrata, l'intera filiera di gestione degli effluenti.

Lo spargimento a tutto campo senza interrimento è la modalità di distribuzione più emissiva ed in questo caso l'azione del vento sembra influenzare maggiormente i tassi di emissione che non quando viene effettuata la incorporazione.

Dalle elaborazioni su dati misurati risulta che le caratteristiche del refluo e il pH del suolo influenzano le emissioni di ammoniaca nella fase di distribuzione in campo. Sarebbe utile approfondire in futuro la concomitanza e l'influenza associata di altri fattori, quali, ad esempio, il tempo di incorporazione dei reflui nel terreno e ulteriori parametri chimico-fisici del suolo. ■

Riferimenti bibliografici

- AgrEE tool – Agricultural Emission Estimation tool. Disponibile su: https://www.tfeip-secretariat.org/_files/ugd/e5a9c7_eee53299f86948edac11147fc7134390.pdf
- ALFAM2 Project – Ammonia Loss from Field-Applied Manure. Disponibile su: <https://projects.au.dk/alfam>
- Ambelas-Skjøth C., Hertel O., Gyldenkærne S. et al. (2004). Implementing a dynamical ammonia emission parameterization in the large-scale air pollution model ACDEP. *J. Geophys. Res.*, 109(D06306).
- Angelino E., Costa M.P., D'Allura A. et al. (2013). Air quality influence of ammonia and nitrogen oxides emissions reduction over the Po valley. Convegno: Proceedings of 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Madrid, 6-9 maggio 2013.
- Beltran I., van der Weerden T.J., Alfaro M.A et al. (2021). DATAMAN: A global database of nitrous oxide and ammonia emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *J. Environ. Qual.* 2021, 50(2): 513–527.
- Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (eds) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen, Centre for Ecology and Hydrology, Edimburgo, Regno Unito.
- Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA), BAT-tool – Un software per il calcolo delle emissioni di ammoniaca dagli allevamenti intensivi di suini e avicoli. Disponibile su: www.crpa.it/battool
- Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA), 2021. Software BAT-tool plus. Manuale di utilizzo. Progetto LIFE_PREPAIR. Disponibile su: https://www.crpa.it/media/documents/crpa_www/Software/bat-tool/Manuale_BAT-tool_Plus_rev1.pdf
- CTN_ACE (2001). Linee guida agli inventari locali di emissioni in atmosfera, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, RTI CTN_ACE 3/2001.
- DATAMAN – A Database of Greenhouse Gas Emissions from Manure Management. Disponibile su: <https://www.dataman.co.nz/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- Decisione di Esecuzione (UE) 2017/302 della Commissione del 15 febbraio 2017 che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) concernenti l'allevamento intensivo di pollame o di suini, ai sensi della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio.
- Decreto n. 5046 del 25 febbraio 2016. Criteri e norme tecniche generali per la disciplina regionale dell'utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue, nonché per la produzione e l'utilizzazione agronomica del digestato.
- Decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152 e s.m.i. Norme in materia ambientale.
- De Lauretis R., Taurino E., Angelino E. et al. (2012). Qualità dell'ambiente urbano VIII Rapporto Edizione 2012, Emissioni in atmosfera: 138-143. Disponibile su:

- https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/VIII_RAPP_AREE_URBANE.pdf
- Direttiva 2010/75/UE/IED – Industrial Emissions Directive.
 - Direttiva 2016/2284/UE/NEC – National Emission Ceilings.
 - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories.
 - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories.
 - EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019. Capitoli 3B e 3D.
 - Gyldenkærne S., Ambelas-Skjøth C., Hertel O., Ellermann T. (2005). A dynamical ammonia emission parameterization for use in air pollution models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 2005, 110(7): 1–14.
 - FarmAC model. Disponibile su: <https://www.farmac.dk/>
 - Hafner S.D., Pacholski A., Bittman S. et al. (2017). The ALFAM2 database on ammonia emission from field-applied manure: Description and illustrative analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 258(2018): 66–79.
 - Hassouna M., van der Weerden T.J., Beltran I. et al. (2023). DATAMAN: A global database of methane, nitrous oxide, and ammonia emission factors for livestock housing and outdoor storage of manure. *Journal of Environmental Quality*, 52(1): 207–223.
 - Huang X., Song Y., Li M. et al. (2012). A high-resolution ammonia emission inventory in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1).
 - Hutchings N.J., Sommer S.G., Andersen J.M., Asman W.A.H.A. (2001). A detailed ammonia emission inventory for Denmark. *Atmospheric Environment* 2001, 35(11): 1959–1968.
 - IPCC, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use, Capitolo 10 – Emissions From Livestock And Manure Management.
 - IPCC, Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019.
 - ISPRAa, Italian Informative Inventory Report 2023.
 - ISPRAb, Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2021. National Inventory Report 2023.
 - Disponibili su: <http://emissioni.sina.isprambiente.it/inventario-nazionale/#Documenti Manure Management N-flow tool>. Disponibile su: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/4-agriculture/manure-management-n-flow-tool/view>
 - Marongiu A., Collalto A.G., Distefano G.G., Angelino E. (2023). Application of Machine Learning to Estimate Ammonia Atmospheric Emissions. Preprints 2023, 2023090607. <https://doi.org/10.20944/preprints202309.0607.v1>
 - Pain B. e Menzi H. (2011). Glossary of terms on livestock and manure management 2011, Second Edition.
 - Reis S., Ambelas-Skjøth C., Vieno M. et al. (2011). Why time and space matters-arguments for the improvement of temporal emission profiles for atmospheric dispersion modeling of air pollutant emissions. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia.
 - SNPA (2016). Inventari regionali delle emissioni in atmosfera e loro articolazione a livello locale. Disponibile su: https://www.isprambiente.gov.it/files/snpa/consiglio-federale/DOC78_CFIinventariemissioniinatmconallegati.pdf
 - Sutton P., Chemel C., Griffiths S., Sokhi R.S. (2012). Investigation, using CMAQ, of sensitivity of air quality modelling to input ammonia emissions. *Air Pollution Modeling and its Application XXII*: 571-575.
 - TFEIP – Task Force on Emission Inventories and Projections (2023). Disponibile su: <https://www.tfeip-secretariat.org/>
 - van der Weerden T.J., Noble A., de Klein C.A.M. et al. (2012). Ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Journal of Environmental Quality*, 50(5):1005–1023.
 - van der Weerden T.J., Noble A., Beltran I. et al. (2023). Influence of key factors on ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *Science of the Total Environment* 889.
 - Webb J., van der Weerden T.J., Hassouna M., Amon B. (2021). Guidance on the conversion of gaseous emission units to standardized emission factors and recommendations for data reporting. *Carbon Management*, 12(6): 663-679.

Ringraziamenti

Il lavoro descritto nel presente articolo è stato svolto nell'ambito del "Progetto di monitoraggio delle concentrazioni di ammoniacale dal comparto agricolo" richiesto ad ARPA Lombardia da Regione Lombardia e che prevede uno studio specifico di approfondimento dell'impatto del comparto agricolo sulle emissioni di ammoniacale <https://www.arpalombardia.it/progetti/aria/progetto-ammoniaca-2017-oggi/>. Si ringrazia la Direzione Generale Agricoltura, Alimentazione e Sistemi Verdi di Regione Lombardia.

Materiale supplementare è disponibile gratuitamente all'indirizzo www.ingegneriadellambiente.net



INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2023 è sostenuta da:



INGEGNERIA
DELL'AMBIENTE



N. 4/2023



Veolia Water Technologies Italia S.p.A.



STADLER ITALIA S.r.l.