



ENERGIA E SOSTENIBILITÀ PER LA PUBBLICA AMMINISTRAZIONE

Quadro normativo aggiornato e approcci innovativi sul contenimento di emissioni di ammoniaca nell'ambiente conseguenti all'utilizzo di fertilizzanti

ES-PA linea 2.4.2 "Strumenti per il calcolo delle emissioni ammoniacali dei fertilizzanti e del settore zootecnico"

Chiara Nobili³, Annamaria Bevivino³, Angelo Camassa³, Nicola Colonna², Ilaria D'Elia¹,
Claudia Dalmastrì³, Anna Spagnoletta⁴, Alessandra Verardi⁴, Giovanni Vialetto¹

¹Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali – Divisione modelli e tecnologie per la riduzione degli impatti antropici e dei rischi naturali - Laboratorio Inquinamento atmosferico

²Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e territoriali - Divisione Biotecnologie e Agroindustria

³Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e territoriali - Divisione Biotecnologie e Agroindustria - Laboratorio Sostenibilità, qualità e sicurezza delle produzioni agroalimentari

⁴Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e territoriali - Divisione Biotecnologie e Agroindustria – Laboratorio Biotecnologie e Bioprocessi

Quadro normativo aggiornato e approcci innovativi sul contenimento di emissioni di ammoniaca nell'ambiente conseguenti all'utilizzo di fertilizzanti

C. Nobili, A. Bevivino, A. Camassa, N. Colonna, I. D'Elia, C. Dalmastrì, A. Spagnoletta, A. Verardi, G. Vialetto

Abstract

Il presente rapporto fornisce un quadro di riferimento sintetico ed aggiornato delle informazioni di natura normativa, tecnica e statistica connesse all'impiego dei fertilizzanti azotati nel contesto italiano, utile per la valutazione delle emissioni di ammoniaca e l'elaborazione di strategie per il loro contenimento.

L'elaborazione è avvenuta nell'ambito del Progetto ES-PA (Energia e Sostenibilità per la Pubblica Amministrazione) realizzato da ENEA e finanziato da ACT (Agenzia per la Coesione Territoriale) allo scopo di supportare le amministrazioni regionali e provinciali nella predisposizione di piani e programmi al fine di individuare soluzioni per la riduzione delle emissioni di ammoniaca nell'ambiente.

Tipologia di prodotto: Rapporto tecnico

Settore d'intervento: Economia circolare e simbiosi industriale



INDICE

1.	<u>INTRODUZIONE</u>	<u>5</u>
2.	<u>INQUADRAMENTO NORMATIVO.....</u>	<u>7</u>
3.	<u>ANALISI DELLE EMISSIONI</u>	<u>10</u>
4.	<u>APPROCCI INNOVATIVI PER IL CONTENIMENTO DELLE EMISSIONI</u>	<u>18</u>
4.1	PRATICHE AGRONOMICHE.....	19
4.2	PRODOTTI FERTILIZZANTI INNOVATIVI	21
4.3	UTILIZZO DELLE RISORSE MICROBICHE PER INCREMENTARE LA FERTILITÀ DEL SUOLO E DIMINUIRE L'USO DI FERTILIZZATI AZOTATI.....	22
5.	<u>BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI</u>	<u>26</u>

INDICE DELLE TABELLE E DELLE FIGURE

Figura 1 – Ciclo dell'azoto	5
Figura 2 Fonti emissive di NH ₃ del settore agro-zootecnico relative all'anno 2019 in Italia.....	11
Figura 3 – Andamento delle emissioni di ammoniaca, categorie NFR.....	13
Figura 4 – Confronto tra gli scenari emissivi nazionali WM e WAM di NH ₃ (in kt)	16
Tabella 1 - Obiettivi di riduzione emissioni di inquinanti al 2020 e al 2030 assegnati all'Italia dalla Direttiva NEC 2016/2284/UE.	9
Tabella 2 – Inventario nazionale emissioni 1990-2018.....	12
Tabella 3 - Codifica di alcuni settori nella nomenclatura NFR.....	13
Tabella 4 – Fattori di emissione relativi all'azoto totale emesso utilizzati per l'inventario nazionale delle emissioni.	15
Tabella 5 – Misure di mitigazione, obbligatorie e facoltative, per l'abbattimento dell'ammoniaca tramite diverso uso dei fertilizzanti.....	17

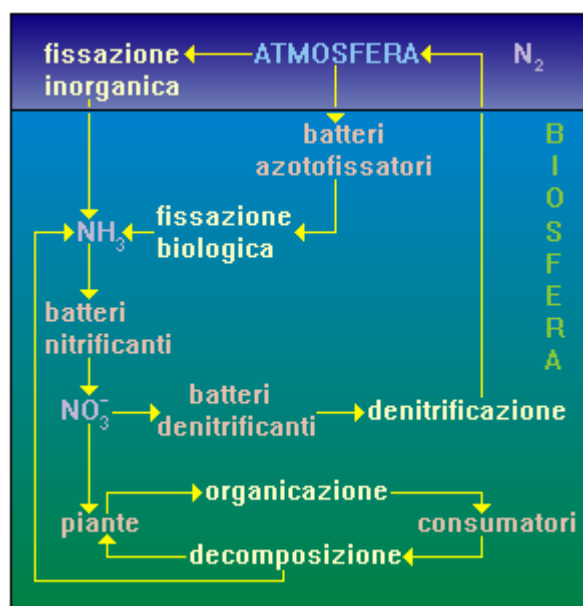
1. INTRODUZIONE

L'azoto è l'elemento più abbondante nella materia organica dopo carbonio, ossigeno e idrogeno. In natura è presente sotto forma di molecole organiche complesse (proteine), e inorganiche come composti ammoniacali ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) e nitrati (NO_3) prevalenti nel suolo e in forma gassosa (N_2) presente nell'atmosfera.

L'ammoniaca, con formula chimica NH_3 , a temperatura ambiente è un gas incolore, dall'odore pungente con una soglia di percettibilità di 1,5 ppm, irritante e tossico ed è il gas alcalino maggiormente presente in atmosfera (Yu et al., 2018).

Durante il ciclo dell'azoto (Fig. 1), l'ammoniaca viene prodotta mediante i processi di azotofissazione e ammonificazione (dalla degradazione di composti organici azotati), mentre la riduzione dissimilativa dei nitrati contribuisce alla sua produzione, e viene degradata tramite nitrificazione.

Figura 1. Ciclo dell'azoto (http://venus.unive.it/miche/cicli_ecosis/0034.htm)



Nel processo di fissazione, l'azoto molecolare atmosferico (N_2), nella sua forma inerte e non direttamente utilizzabile dalla maggior parte degli organismi viventi, viene ridotto a ione ammonio (NH_4^+) grazie all'azione di microrganismi (fissazione biologica), tra cui batteri presenti liberi nel suolo (ad esempio, i batteri del genere *Azotobacter*) e batteri simbiotici contenuti nei tubercoli radicali delle piante leguminose (quali, i batteri del genere *Rhizobium*). Gli NH_3 generati ad una certa profondità dalla superficie vengono per lo più convertiti in molecole organiche dal metabolismo microbico, e l'insieme di questi processi costituisce la cosiddetta immobilizzazione microbica, mentre quelli prodotti vicino alla superficie subiscono variazioni di concentrazione e prendono parte al bilancio atmosferico. Per inquadrare correttamente nel contesto ambientale i meccanismi di rilascio nonché quelli di recupero di ammoniaca nell'ambiente, è pertanto necessario considerare i processi biogeochimici che riguardano i composti azotati e gli organismi coinvolti.

Attualmente, i delicati equilibri dei vari ecosistemi sono fortemente sbilanciati a causa dell'aumento del rilascio di NH_3 nell'aria, derivante sia dai suoli agricoli, per l'utilizzo massivo di concimi azotati di sintesi (urea, nitrato di urea-ammonio, ammoniosolfato, nitrato di ammonio e fosfato di ammonico) (Insauti et al., 2019), sia dagli effluenti zootecnici ricchi di composti azotati "eccedenti", provenienti da diete con mangimi ad alto contenuto di azoto, utilizzate per soddisfare le esigenze nutrizionali degli animali (Waldrup et al., 2015). Su entrambe queste fonti, diversi fattori naturali accelerano la velocità del processo di emissione di NH_3 , quali: l'elevata temperatura dell'aria e le radiazioni, il vento, la basicità del suolo o dell'effluente, la lunga durata di esposizione e la scarsa infiltrazione delle superfici oggetto dello spandimento.

In atmosfera, invece, l'ammoniaca, data la sua natura chimica alcalina, determina reazioni di neutralizzazione di alcuni gas acidi presenti in atmosfera quali l'acido solforico (H_2SO_4) e l'acido nitrico (HNO_3), da cui si ottiene solfato di ammonio ($(NH_4)_2SO_4$ o NH_4HSO_4) e nitrato di ammonio (NH_4NO_3) (Yu et al., 2018).

Tali molecole costituiscono i principali componenti del particolato secondario inorganico (PM) costituito da particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10 μm (PM10) oppure ai 2,5 μm (PM2,5 o "particolato fine").

Le particelle inquinanti secondarie (PM10 e PM2,5), formate dall'ammoniaca in combinazione con altri inquinanti atmosferici, rimangono nell'aria per diversi giorni e sono trasportati per lunghe distanze, causando effetti negativi anche sulla salute umana (Guthrie et al., 2018).

Dato l'alto potenziale inquinante dell'ammoniaca, il contenimento delle relative emissioni nell'ambiente è oggetto di normativa europea e nazionale in costante aggiornamento.

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

La riduzione e il conseguente controllo delle emissioni di ammoniaca rappresentano sempre più una priorità nell'ambito della tutela e della salvaguardia ambientale. L'ammoniaca infatti riveste un ruolo significativo nel ciclo dell'azoto reattivo, contribuendo significativamente al fenomeno dell'eutrofizzazione, e rappresenta un precursore importante del particolato secondario inorganico.

Negli ultimi anni sono stati emanati specifici provvedimenti normativi che, prendendo ispirazione dal protocollo di Göteborg (1999)¹, tendono, attraverso una cooperazione internazionale, a limitare nonché ridurre e prevenire gradualmente l'inquinamento atmosferico. Il protocollo di Göteborg è stato approvato dal Consiglio Europeo a nome dell'UE nel giugno 2003 e recepito nel diritto dell'UE principalmente con la direttiva NEC (National Emission Ceiling)² del 2001. Il protocollo di Göteborg, fa parte degli 8 protocolli sottoscritti dalla Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (UNECE) nell'ambito della Convenzione sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga

¹ <https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/guidance-documents/gothenburg-protocol.html>

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016L2284&from=EN>

distanza (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) sottoscritta da 51 Paesi già nel 1979.

Nel 2012 la Commissione ha presentato una proposta di revisione del protocollo di Göteborg a nome dell'UE, con la quale si volevano stabilire nuovi impegni nazionali di riduzione delle emissioni di ossidi di zolfo (principalmente anidride solforosa), ossidi d'azoto, ammoniaca, composti organici volatili non metanici (COVNM) e particolato atmosferico fine (PM_{2.5}) a partire dal 2020.

A seguito di una lunga trattativa tra gli Stati membri è stata emanata la direttiva 2016/2284/UE che stabilisce i nuovi tetti nazionali alle emissioni. Questa direttiva europea è stata recepita dallo stato italiano con un Decreto di legge di delegazione europea n. 81 del 30 maggio 2018³. In sostanza la legge italiana recepisce integralmente quanto già previsto dalla Direttiva Europea.

La direttiva NEC prevede la fissazione di percentuali di riduzione delle emissioni (rispetto all'anno base 2005), specifici per ciascuno Stato Membro, degli inquinanti quali biossido di zolfo (SO₂), ossidi di azoto (NO_x), ammoniaca (NH₃), particolato atmosferico fine (PM_{2,5}) e composti organici volatili non metanici (COVNM), da perseguire al 2020 e al 2029. Gli obiettivi di riduzione al 2020 sono quelli già negoziati per il Protocollo di Göteborg, non ancora ratificato dall'Italia, mentre gli obiettivi fissati per il 2030 sono il risultato del negoziato comunitario e corrispondono al conseguimento della riduzione di circa il 50% di morti premature al 2030 rispetto all'anno base 2005 (COM, 2018).

I tetti di riduzione delle emissioni per l'Italia previsti dalla direttiva sono riportati nella tabella 1.

³ <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/07/02/18G00096/sg>

Tabella 1: Obiettivi di riduzione emissioni di inquinanti al 2020 e al 2030 assegnati all'Italia dalla Direttiva NEC 2016/2284/UE.

INQUINANTE	Obiettivo riduzione emissioni per qualsiasi anno dal 2020 al 2029 rispetto all'anno base 2005	Obiettivo riduzione emissioni per qualsiasi anno a partire dal 2030 rispetto all'anno base 2005
SO₂	35%	71%
NO_x	40%	65%
PM_{2,5}	10%	40%
COVNM	35%	46%
NH₃	5%	16%

Tali limiti alle emissioni hanno l'obiettivo di conseguire livelli di qualità dell'aria che non comportino impatti negativi e rischi significativi per la salute umana e l'ambiente.

Inoltre, tra gli obblighi della Direttiva, è previsto che ogni Stato membro trasmetta il suo primo programma nazionale di controllo dell'inquinamento atmosferico alla Commissione Europea entro il 1° Aprile 2019.

I dati da trasmettere sono indicati nel Programma Nazionale di Controllo dell'Inquinamento Atmosferico⁴ (PNCIA o NAPCP) che è lo strumento finalizzato a limitare le emissioni di origine antropica per rispettare gli impegni di riduzione previsti per l'Italia dalla Direttiva NEC. Particolare rilievo è dato alla definizione di un quadro istituzionale atto ad assicurare un'azione coordinata ed omogenea di più autorità statali, regionali e locali che nasce dall'esigenza, espressamente prevista dalla direttiva, di garantire la coerenza tra il

⁴ https://cdr.eionet.europa.eu/it/eu/nec_revised/programmes/envxioxug

programma nazionale, le politiche in materia di clima e di energia e tutti gli strumenti che interessano i diversi settori fonti di emissioni.

Per il settore agricoltura, indicazioni per limitare l'impiego di taluni fertilizzanti e particolari accorgimenti nella gestione degli effluenti di allevamento (vedi capitolo successivo), si possono rinvenire nel codice di buone pratiche agricole allegate al PNCA.

Per quanto riguarda l'uso di fertilizzanti azotati, il codice sottolinea come la redazione di piani di concimazione basati sul bilancio degli elementi nutritivi rappresenti sempre una buona pratica agricola in grado di aumentare l'efficienza d'uso dell'azoto e quindi ridurre le perdite. Il codice suggerisce l'adozione di una serie di misure in grado di ridurre le emissioni di ammoniaca tra le quali:

- incorporazione dei fertilizzanti nel terreno nel tempo più breve possibile;
- irrigazione immediatamente dopo la distribuzione dei fertilizzanti ad eccezione delle colture a ciclo autunno-vernino in ambienti in regime non irriguo e tenuto conto della tipologia del suolo e della vulnerabilità alla lisciviazione dei nitrati;
- diffusione di tecniche di fertirrigazione;
- adozione di pratiche di agricoltura di precisione;
- uso di inibitori dell'ureasi e della nitrificazione;
- sostituzione con altre tipologie di concimi azotati quali nitrato di ammonio, organo minerali, a lento rilascio, a cessione controllata, ricoperti, etc.;
- sostituzione dell'urea e dei concimi azotati minerali con fertilizzanti organici con distribuzione eseguita, così come disciplinato dai programmi d'azione vigenti in materia di distribuzione effluenti, e comunque entro le 24 ore.

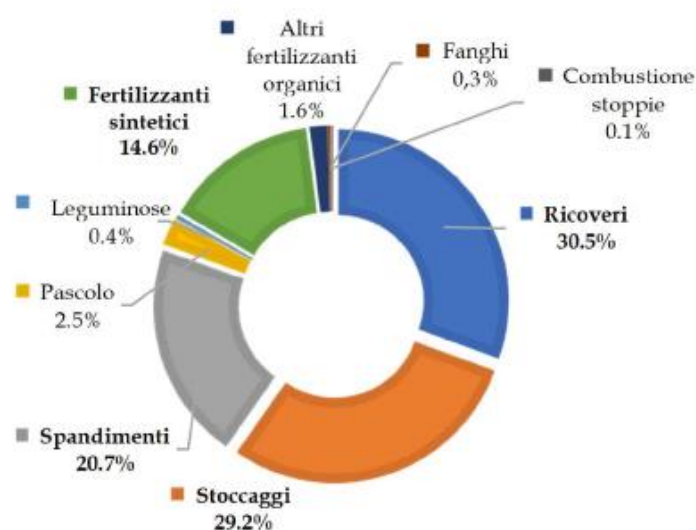
3. ANALISI DELLE EMISSIONI

In Europa, la principale fonte di ammoniaca è rappresentata dalle emissioni che derivano dall'agricoltura. In particolare, nel 2019 le emissioni di NH_3 dal settore agricoltura-zootecnia hanno rappresentato il 94,2% delle emissioni di NH_3 totali, dove, le emissioni dal settore degli allevamenti bovini in tutti gli stadi connessi alla produzione zootecnica (ricovero,

stoccaggio degli effluenti e applicazione agronomica), dallo spandimento del letame all'uso di fertilizzanti azotati inorganici, hanno costituito le categorie emissive più rilevanti contribuendo per l'80,4% (Fig. 2). L'utilizzo dei fertilizzanti azotati sintetici rappresenta il 14,6% (ISPRA, IIR 2020).

Anche a livello nazionale, la gran parte delle emissioni di NH_3 proviene dal settore agricolo, prodotte principalmente dalle forme intensive che l'agricoltura ha assunto negli ultimi decenni e, in particolare, dall'utilizzo esteso dei fertilizzanti e dagli allevamenti animali.

Figura 2 – Fonti emissive di NH_3 del settore agro-zootecnico relative all'anno 2019 in Italia (ISPRA, IIR, 2020).



L'andamento dei livelli emissivi degli inquinanti oggetto della direttiva NEC ha subito consistenti riduzioni nel corso degli ultimi dieci anni, a seguito dei cambiamenti nelle strategie europee di gestione di alcuni settori inquinanti e delle misure di riduzione adottate a livello nazionale e regionale.

Grazie agli interventi normativi attuati in tal senso, le emissioni di ammoniaca sono calate in modo significativo nel corso degli anni. In particolare, dal 1990 al 2018 si è registrata una riduzione delle emissioni di NH_3 del 21,6%, passando da 450 Gg a 345 Gg (Tabella 2).

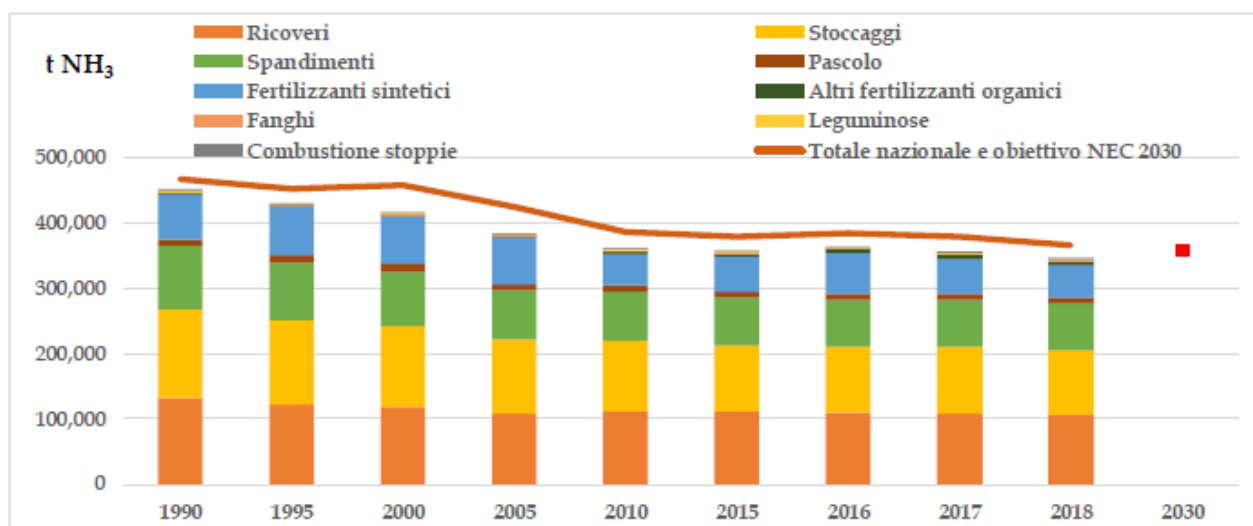
Tabella 2: Inventario nazionale emissioni 1990-2018 (fonte ISPRA, IIR, 2020).

anno NH ₃ (Gg)	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Totale	450	429	416	383	360	356	363	356	345
Ricoveri	133	123	119	108	111	112	110	108	105
Stoccaggi	136	128	123	115	109	102	101	102	101
Spandimenti	97	89	84	75	75	73	72	72	71
Pascolo	10	11	11	9	9	9	9	9	9
Fertilizzanti sintetici	70	73	73	71	48	54	63	54	50
Altri fertilizzanti organici	1,3	1,5	1,8	1,8	3,2	4,7	4,6	7,1	5,6
Fanghi	0,7	1,1	1,4	1,2	1,3	1,1	0,9	0,9	0,9
Leguminose	2,4	1,6	1,6	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,3
Combustione stoppie	487	480	481	519	502	509	545	494	489

Tale andamento è attribuibile principalmente ad una riduzione delle emissioni del settore agro-zootecnico, in particolare alla contrazione del numero di capi allevati di alcune specie zootecniche, alla riduzione dell'uso di fertilizzanti azotati sintetici e delle superfici e produzioni agricole, alla diffusione di tecniche di abbattimento delle emissioni nella gestione degli allevamenti

In figura 3 è riportato l'andamento delle emissioni di NH₃, calcolato nell'inventario nazionale delle emissioni prodotti da ISPRA, in riferimento al periodo che va dal 2005 al 2018.

Figura 3 – Andamento delle emissioni di ammoniaca, categorie NFR (ISPRA, IIR, 2020).



Le emissioni annuali rappresentate nella figura 1 sono date dalla somma delle emissioni provenienti da vari settori la cui codifica, così come utilizzata nell'ambito della nomenclatura presente nel reporting delle emissioni ai sensi della direttiva NEC (NFR – Nomenclature For Reporting), è riportata nella tabella seguente (Tabella 3).

Tabella 3 – Codifica di alcuni settori nella nomenclatura NFR.

Codice NFR	Settore
1A3	Trasporti
1B	Emissioni provenienti da combustibili
3	Agricoltura
3B	Emissioni agricole per la gestione del letame
3D	Terreni agricoli
5A	Smaltimento dei rifiuti solidi in discarica

Sebbene per l'ammoniaca si registri al 2018 una riduzione pari a circa il 14% rispetto al 2005, questo inquinante è l'unico per il quale l'andamento non è orientato verso la riduzione decisa delle emissioni, essendo soggetto anche a fluttuazioni interannuali (IIR, 2020).

Gli interventi di riduzione delle emissioni in questo ambito agiscono sia limitando lo spandimento agronomico degli effluenti di allevamento sia l'uso dei fertilizzanti chimici.

Come è chiaramente evidente dai dati di inventario, l'uso ed il consumo di fertilizzanti azotati contribuiscono in maniera non trascurabile alle emissioni totali di ammoniaca. Ma non tutti i fertilizzanti azotati contribuiscono allo stesso modo, in quanto diversa è la quantità di azoto che questi rilasciano, come diversi sono i dati effettivi di consumo dei vari fertilizzanti, elementi che vanno tenuti ben presenti se si vuole introdurre una politica di riduzione delle emissioni efficace. Dal punto di vista delle emissioni, difatti, l'urea contribuisce per l'85% alle emissioni di ammoniaca provenienti dall'uso di fertilizzanti azotati, mentre tutti gli altri fertilizzanti azotati contribuiscono solo per il 15 %.

Dal punto di vista del rilascio in atmosfera di azoto, i fertilizzanti possono infatti essere suddivisi in due grosse categorie: quelli a base di urea, caratterizzati da un fattore di emissione del 15% circa rispetto all'azoto emesso, e gli altri fertilizzanti azotati, caratterizzati da un fattore di emissione mediamente del 2%, con la sola eccezione del solfato ammonico, che presenta invece un fattore di emissione del 10 % circa (Tabella 4).

Tabella 4 – Fattori di emissione relativi all'azoto totale emesso dai fertilizzanti, presenti nell'inventario nazionale delle emissioni (fonte: ISPRA, IIR 2020).

Categoria di fertilizzante	Fattore di emissione
Solfato ammonico	8%
Calciocianamide	1%
Nitrato ammonico <27%	1%
Nitrato ammonico >27%	1%
Urea	13%
Altri azotati nitrico	1%
Altri azotati ammoniacale	1%
Altri azotati ammidico	13%
Azoto fostatici	6%
Azoto potassici	2%
Fosfo azoto potassici	6%
Organo minerali	1%

L'andamento del trend emissivo osservato per le emissioni di NH_3 rende quindi necessaria l'elaborazione di scenari emissivi per verificare il rispetto degli obiettivi imposti dalla Direttiva NEC al 2020 e al 2030 e l'eventuale necessità di selezionare misure aggiuntive di riduzione delle emissioni.

Il D.Lgs. 155/2010⁵ e il D.Lgs. 81/2018⁶ assegnano all'ENEA il compito di predisporre scenari emissivi e di qualità dell'aria nazionali.

Questi sono stati prodotti da ENEA utilizzando il sistema modellistico MINNI (Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'inquinamento atmosferico), una suite modellistica sviluppata, per conto del Ministero dell'Ambiente, da ENEA in collaborazione con ARIANET s.r.l. e IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis).

⁵ <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/10155dl.htm>

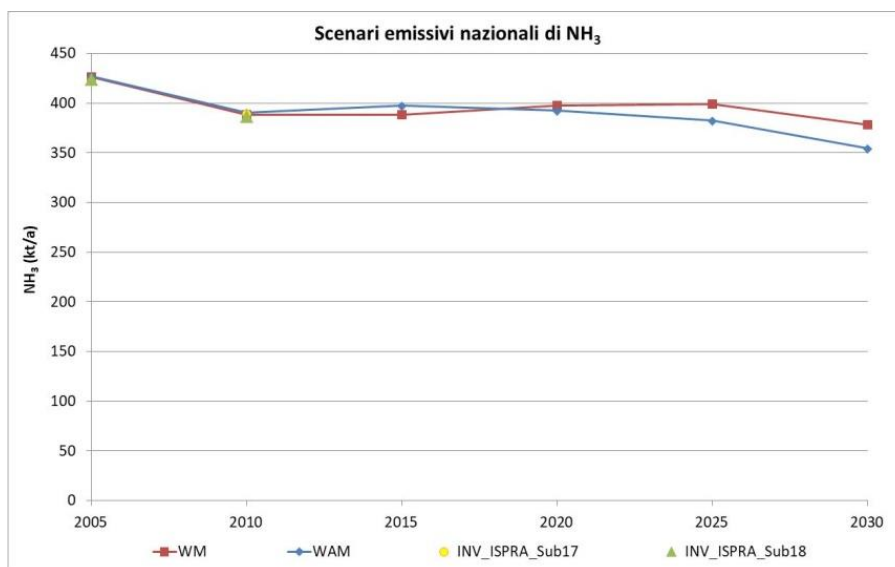
⁶ <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/07/02/18G00096/sg>

Per il PNCA sono stati elaborati due diversi scenari:

- lo scenario WM (With Measures);
- lo scenario WAM (With Additional Measures).

I risultati per l'ammoniaca sono riportati nella figura seguente (Fig. 4).

Figura 4 – Confronto tra gli scenari emissivi nazionali WM e WAM di NH₃ (in kt) (fonte ENEA, PNCA).



L'ammoniaca è l'inquinante che mostra le minori riduzioni tra i due scenari, riduzioni che sono praticamente coincidenti al 2020 e con una differenza di circa il 6% al 2030 a favore dello scenario WAM. La riduzione che si osserva dal 2020 al 2030 è principalmente legata ad una riduzione delle emissioni dagli allevamenti bovini e suinicoli. Il Ministero dell'Ambiente ha ritenuto di intervenire in uno dei settori suggeriti dalle "Linee guida agricole per la riduzione delle emissioni di ammoniaca nel Bacino Padano" (MIPAAF, 2016) ipotizzando una riduzione del consumo di urea al 2030 efficace per il rispetto del tetto. Tale riduzione è di circa il 21% nello scenario WAM rispetto allo scenario WM e non altera il contributo dei vari settori alle emissioni totali di NH₃ che restano dominate dagli allevamenti di bovini, seguite dagli allevamenti avicoli e suinicoli e dal consumo di urea.



ENERGIA E SOSTENIBILITÀ
PER LA
PUBBLICA AMMINISTRAZIONE

La stessa riduzione potrà essere conseguita anche con misure di diversa tipologia in grado di produrre risultati equivalenti. La distribuzione settoriale degli scenari sottolinea la rilevanza del settore zootecnico come ulteriore possibile settore di intervento.

Per quanto riguarda le riduzioni di ammoniaca dal settore Agricoltura, le misure sono state concordate con il Ministero delle politiche agricole alimentari forestali (MIPAAF) e sono relative alla maggiore diffusione di buone pratiche agricole. Le indicazioni fornite dal MIPAAF sono contenute nel “Codice nazionale indicativo di buone pratiche agricole per il controllo delle emissioni di ammoniaca”, allegato al PNCA.

Le misure obbligatorie e facoltative indicate per raggiungere una riduzione di emissione di ammoniaca pari almeno a quella prevista per legge sono riportate in tabella 5.

Tabella 5 – Misure di mitigazione, obbligatorie e facoltative, per l'abbattimento dell'ammoniaca tramite diverso uso dei fertilizzanti

Misura di abbattimento	Tipo di fertilizzante	Riduzione delle emissioni di NH ₃ (%)
MISURA OBBLIGATORIA		
Incorporazione fertilizzanti	Base di urea	50-80
MISURE FACOLTATIVE		
Inibitori di ureasi	Base di urea	70 (urea solida) 40 (urea liquida; nitrato d'ammonio)
Fertilizzanti a lento rilascio (rivestimento polimerico)	Base di urea	30
Iniezione a solchi chiusi	Base di urea e ammoniaca anidra	80-90
Irrigazione	Tutti	40-70
Sostituzione con nitrato d'ammonio	Base di urea e ammoniaca anidra	Fino a 90

L'obiettivo delle misure obbligatorie, che riguardano l'impiego di fertilizzanti a base urea, è di raggiungere, a livello nazionale, una riduzione del 16% delle emissioni di ammoniaca. Ulteriori misure facoltative inerenti ad un diverso uso dei fertilizzanti potranno essere adottate per raggiungere riduzioni aggiuntive delle emissioni o in alternativa alle misure obbligatorie qualora esse non siano realizzabili o risultino di difficile realizzazione dal punto di vista tecnico ed economico.

Tali misure potranno essere adottate purché gli interventi scelti garantiscano, complessivamente, una riduzione delle emissioni equivalente o superiore a quella ottenibile tramite l'applicazione delle misure obbligatorie. Qualora le misure facoltative utilizzate appartengano ad una fase produttiva aziendale diversa da quella individuata per la misura obbligatoria, l'equivalenza della riduzione delle emissioni dovrà risultare dal bilancio dell'azoto aziendale.

4. APPROCCI INNOVATIVI PER IL CONTENIMENTO DELLE EMISSIONI

Una parte significativa delle emissioni di ammoniaca è associata alle misure di fertilizzazione delle colture realizzate sia tramite l'impiego dei reflui zootecnici che dei fertilizzanti azotati (organici e inorganici).

La produzione e la distribuzione di fertilizzanti costituiscono elementi chiave per ridurre in modo significativo le emissioni di ammoniaca dal settore agricolo attraverso soluzioni ed interventi innovativi.

A tal proposito, è auspicabile la messa in atto da parte delle imprese agricole di azioni e pratiche razionali e/o innovative quali:

- l'adozione di pratiche di agricoltura di precisione, di concimazione localizzata e di fertirrigazione al fine di ottimizzare e risparmiare le dosi fertilizzanti.
- L'impiego di fertilizzanti a lento rilascio per ottimizzare la disponibilità dei nutrienti nel tempo.

- la sostituzione dell'urea e dei concimi azotati minerali con fertilizzanti organici (effluenti zootecnici, biodigestati, fanghi di depurazione delle acque) con distribuzione eseguita così come disciplinato dai programmi d'azione vigenti in materia di distribuzione effluenti, e comunque entro le 24 ore stabilite dal DM 25 febbraio 2016.
- l'adozione di pratiche agronomiche che prevedano l'uso di microorganismi coinvolti nel ciclo dell'azoto in grado di incrementare la fertilità del suolo, riducendo in tal modo l'utilizzo concimi azotati e il conseguente inquinamento delle acque superficiali e di falda e dell'aria.

4.1 PRATICHE AGRONOMICHE

Numerose sono le pratiche per ridurre le emissioni di ammoniaca e queste sono sintetizzate nelle norme del codice di buone pratiche agricole allegate al PNCA.

Esse per la parte relativa ai fertilizzanti attengono a strategie diverse quali la riduzione di impiego dei fertilizzanti azotati, l'aumento dell'efficienza ed efficacia d'uso, l'uso di formulati di nuova generazione, ognuna di queste singolarmente può contribuire a ridurre le emissioni di ammoniaca e comportano l'adozione da parte degli agricoltori di precauzioni e comportamenti coerenti con gli obiettivi di riduzione dell'impatto emissivo che devono essere divulgate, spiegate e diffuse affinché siano adottate su una larga parte delle superfici agricole.

Poiché l'urea è il fertilizzante azotato con il più elevato fattore di emissione ed è ampiamente utilizzato nel nostro paese le misure e le precauzioni descritte sono espressamente rivolte a migliorarne le pratiche di distribuzione e l'efficacia di impiego.

- Interramento dopo lo spargimento

L'incorporazione dell'urea nel suolo immediatamente dopo o contemporaneamente alla distribuzione, riduce del 70% la potenziale volatilizzazione dell'ammoniaca. Tuttavia, anche in questo caso, le emissioni di ammoniaca rimangono largamente superiori a quelle derivanti dall'impiego di nitrato di calcio e di nitrato ammonico. La profondità di interrimento e la tessitura del suolo influenzano il grado di riduzione delle emissioni.

- Condizioni climatiche

La distribuzione dell'urea in giornate calde e ventose ed in assenza di precipitazioni nel breve periodo dovrebbe essere evitata. Nei suoli secchi, la diffusione dello ione ammonio e dell'urea è lenta e si hanno elevate perdite per volatilizzazione. Suoli umidi ne migliorano la diffusione. Le piogge, dopo l'applicazione del concime, riducono in maniera significativa le emissioni di ammoniaca grazie ad una migliore distribuzione del fertilizzante nel suolo e alla mitigazione dei picchi di pH. Un clima freddo ($< 15\text{ }^{\circ}\text{C}$) frena la formazione di ammoniaca nel suolo e di conseguenza le perdite per volatilizzazione. Tuttavia, le basse temperature, che si verificano spesso in primavera, rallentano il processo di nitrificazione. Rimane così più ammoniaca nel suolo e aumenta il potenziale di perdita per volatilizzazione.

- Condizioni del suolo

Suoli alcalini (pH alto) causano maggiore dispersione di ammoniaca nell'aria. Per questo motivo, urea e urea ammonio nitrato non dovrebbero essere utilizzati su tali suoli. Nei suoli a pH alcalino, l'eccesso di ione ammonio derivante dalla somministrazione di urea risulta anche tossico per i batteri nitrificanti o nitrito-ossidanti, quali quelli appartenente al genere *Nitrobacter*, determinando un accumulo di ioni NO_2 .

- Applicazioni scaglionate

L'applicazione frazionata dell'azoto in diverse fasi del ciclo colturale riduce la concentrazione di ammoniaca e il rischio di volatilizzazione aumentando l'efficienza d'uso dell'azoto. Il frazionamento deve essere realizzato secondo il ciclo di crescita delle piante e le condizioni pedoclimatiche ma è necessario valutare i maggiori costi relativi al lavoro e al consumo di gasolio.

A queste pratiche si aggiungono quelle che riducono l'uso dell'azoto per ettaro di superficie ed attengono alla precisione nella distribuzione, all'applicazione di dosi differenziate in aree diverse delle superfici (VRA, *Variable rate application*) ed all'uso di formulati liquidi distribuiti attraverso i sistemi di irrigazione

4.2 PRODOTTI FERTILIZZANTI INNOVATIVI

Sono disponibili sul mercato una serie di prodotti specifici che attraverso modalità differenti controllano il rilascio dell'azoto nella soluzione del terreno. L'obiettivo di tali prodotti è quello di rendere disponibile l'elemento nel tempo, in accordo alle esigenze nutritive delle piante. Il rilascio è controllato con metodi fisici (rivestimento) o chimici. Solitamente tali prodotti sono indicati con termini spesso impiegati come sinonimi quali: Lento rilascio, Lenta cessione, Cessione controllata. Nella realtà con essi si indicano una serie di prodotti la cui classificazione è oggettivamente complessa. I concimi a "lento rilascio" propriamente detti sono quelli in cui si ha una solubilizzazione lenta dell'azoto presente grazie alle loro specificità chimiche o fisiche mentre con il termine "Cessione controllata" si fa riferimento a quei formulati ricoperti (*coated*) di materiali diversi il cui rivestimento rallenta la solubilizzazione del fertilizzante.

In entrambi i casi il tempo di rilascio del fertilizzante è influenzato dalle condizioni pedoclimatiche dell'area di impiego tra cui le temperature, il pH del terreno, l'umidità ed è quindi opportuno considerare che i loro benefici in termini di riduzioni di emissioni ammoniacali possono variare entro una forchetta di valori ampia.

L'obiettivo comune è aumentare l'efficienza di distribuzione dell'azoto modulando la sua disponibilità nel tempo (Allen, 1984). Il mercato mette a disposizione numerosi formulati specifici per colture e tipo di applicazione e tra questi possiamo distinguere 4 categorie:

- Concimi condensati a bassa solubilità

Ureaformaldeide (UF), Isobutildiediurea (IBDU) la crotonilidendiurea (CDU) ottenuti tramite una reazione dei gruppi ammidici dell'urea con le aldeidi.

- Concimi ricoperti

Nei quali l'elemento fertilizzante è incapsulato con una membrana di materiale insolubile che ne modula il rilascio. Ad esempio impiegando lo zolfo, un polimero od una resina.

- Concimi con inibitori della nitrificazione

Una miscela di un concime minerale od organico con una sostanza in grado di inibire o di ritardare i processi di nitrificazione.



- Concimi con inibitori della ureasi

Una miscela di un concime minerale od organico con una sostanza in grado di inibire o di ritardare l'azione della ureasi che normalmente catalizza l'idrolisi dell'urea e rende disponibile l'ammoniaca.

Tali tipologie di concimi a causa della maggior complessità produttiva hanno un costo elevato che sino ad oggi ne ha limitato l'adozione e l'impiego da parte delle imprese agricole.

Da ultimo è da ricordare che i concimi organici sono per loro natura concimi a lento rilascio in quanto l'azoto è spesso presente in forme eterocicliche che sono degradate ad opera della biomassa microbica. In commercio esistono numerosi formulati organo minerali ottenuti per miscelazione o reazione e che possono quindi unire forme di azoto a pronto effetto con altre a più lento rilascio.

Le innovazioni, soprattutto nei formulati, sono numerose e l'industria dei fertilizzanti mette a disposizione una gamma molto ampia di prodotti che soddisfano le esigenze delle colture ma anche delle diverse tipologie di suolo, consentendo all'agricoltore di scegliere la miglior soluzione al fine di contemperare le esigenze nutrizionali con le esigenze dell'ambiente tenendo conto che ogni azione che diminuisce le perdite di azoto ne aumenta l'efficienza d'uso.

Ai nostri fini è però da tener conto che l'insieme dei fattori ambientali (clima, suolo) e gestionali (tempi e modalità di distribuzione) che influenzano l'efficacia dei fertilizzanti innovativi impongono sempre nelle stime di emissione l'impiego del fattore di emissione più conservativo (Tabella 5).

4.3 UTILIZZO DELLE RISORSE MICROBICHE PER INCREMENTARE LA FERTILITÀ DEL SUOLO E DIMINUIRE L'USO DI FERTILIZZATI AZOTATI

Il bilancio di ammoniaca nell'ambiente è strettamente collegato alle reazioni di trasformazione dei composti azotati nell'ambito del ciclo dell'azoto, alle quali contribuiscono

in misura significativa diversi microrganismi, in particolare quelli responsabili della fissazione dell'azoto e della denitrificazione, che determinano, rispettivamente, incremento e riduzione di ammoniaca nel suolo, e gli ammonio ossidanti che in parte contribuiscono all'assimilazione dell'ammoniaca. Nel suolo lo ione ammonio, derivante sia dalla fissazione dell'azoto che dalla concimazione con sali di ammonio e urea, tende ad essere rapidamente ossidato anche per via microbica (nitrificazione); essa si realizza grazie all'azione sequenziale dei nitrosanti-ammonio ossidanti e dei nitricanti-nitrito ossidanti, così che la principale fonte di azoto per le piante è, di fatto, costituita da nitrato.

I microrganismi coinvolti nei processi metabolici del ciclo dell'azoto interagiscono nel suolo in complesse reti metaboliche che sono nell'insieme alla base dello stato di salute dei suoli stessi. In particolare, i batteri che fissano l'azoto atmosferico sono tra i principali microrganismi che esercitano effetti benefici sulle piante promuovendone la crescita (PGPM, Plant Growth-Promoting Microbes), (Stamenković et al., 2018). Date le molteplici interazioni tra le caratteristiche del suolo, le piante e l'insieme dei microrganismi e del loro patrimonio genetico presenti nell'ecosistema (microbioma), il benessere del suolo è essenziale allo sviluppo di quei PGPM che ne mantengono la fertilità favorendo la crescita delle piante (Bevivino, 2019). Pertanto, l'utilizzo delle risorse microbiche volte ad incrementare la fertilità del suolo include sia le azioni che favoriscono l'attività delle comunità indigene sia l'allestimento di inoculanti al fine di gestire in maniera integrata il sistema di nutrizione della pianta. La strategia di gestione integrata della fertilità del suolo prende in considerazione le interazioni non solo tra i diversi microrganismi ma anche tra questi, piante e risorse minerali, con particolare attenzione verso i batteri coinvolti nella fissazione dell'azoto e nella solubilizzazione e mobilizzazione del fosforo (Bargaz, 2018).

Le molteplici interazioni multitrofiche sono alla base della formulazione di inoculanti microbici benefici sotto forma di consorzi microbici e/o di ceppi azoto fissatori selezionati per la fertilizzazione di piante leguminose e non, quindi sia batteri simbiotici che a vita libera (Bargaz, 2018; De Souza, 2015, FAO, 1982). In sostanza, questo approccio fa sì che l'ammonio necessario alle piante venga prodotto dai batteri direttamente nel suolo e nelle radici, invece che addizionato dall'esterno, evitando la dispersione che si verifica coi

fertilizzanti chimici e riducendo le conseguenze negative che ne derivano, dallo spreco dello stesso fertilizzante alla produzione di composti nocivi. A titolo di esempio, si riportano prodotti quali Azofit, contenente *Azotobacter vinelandii*, prodotto dall'azienda russa Sibbiopharm (<http://en.sibbio.ru/catalog/greenhouses/azofit-microbiological-fertilizer/>) e gli inoculanti Alosca®, prodotti da Padana sementi, per la batterizzazione di leguminose foraggere, costituiti da un substrato protettivo in granuli di bentonite al cui interno sono incorporati rizobi selezionati azoto-fissatori. Tra i vantaggi di questa tecnologia va sottolineato come aumenti la fissazione dell'azoto oltre il 50% da parte di alcune specie, permettendo di renderlo disponibile anche per la coltura successiva (<http://www.padanasementi.com/prodotti/semi-per-lagricoltura/rizobi-alosca/>).

Nonostante gli aspetti positivi precedentemente esposti nell'ambito del ciclo dell'azoto, la nitrificazione microbica determina una riduzione dell'efficienza della fertilizzazione attraverso il consumo dell'ammonio, oltre a favorire lo sviluppo di microrganismi ammonio ossidanti alterando l'equilibrio del microbiota indigeno. Dunque sono stati sviluppati sistemi atti a controllare il processo di nitrificazione nel suolo, aumentare l'efficienza dell'uso del concime e parallelamente diminuire le perdite di N per volatilizzazione (NH_3) e lisciviazione (NO_3) la quale, oltre a diminuire il contenuto di azoto nel suolo, determina anche contaminazione delle acque. A tal fine risultano efficaci i concimi azotati a rilascio differito, costituiti da urea in granuli. Una ulteriore alternativa consiste nell'utilizzo di inibitori della nitrificazione batterica come NIs; diciandamide – DCD (Barth, 2020)

Allo stato attuale non risulta vi siano applicazioni microbiche specifiche per suoli agricoli finalizzate a degradare i derivati nocivi del metabolismo di composti azotati.

Da quanto esposto, risulta evidente che il mantenimento dei suoli in condizioni di fertilità ottimali, che è alla base di ogni pratica agricola, è strettamente legato alla presenza di un efficiente microbioma indigeno, costituito da diversi organismi che svolgono funzioni chiave per la vita sulla terra, le cosiddette *life support functions* (LSF). Tali funzioni sono sensibili alle variazioni ambientali e agli stress, e dunque rappresentano un ottimo sistema per valutare lo stato di salute dei suoli. L'uso di indicatori microbici permette di monitorare le condizioni del suolo in relazione non solo a diversi fattori ambientali e di stress ma anche

relativamente all'applicazione di tecniche agronomiche, permettendo di seguire le modificazioni a livello di funzioni essenziali per la fertilità creando così le condizioni per interventi mirati.

I progressi della metagenomica applicata al microbioma del suolo hanno portato alla luce un gran numero di enzimi chiave delle LSF, coinvolti nelle trasformazioni di N, P e S (Schloter, 2018). I geni che codificano gli enzimi coinvolti in queste reazioni rappresentano target ideali per monitorare variazioni metaboliche nei suoli conseguenti a stress che alterano la microflora indigena. Tra questi, in particolare vanno menzionati geni target coinvolti nella fissazione dell'azoto (*nifH*), nitrificazione (*amoA*), denitrificazione (*nir* e *nor*), immobilizzazione dell'N (geni per la glutamina sintasi), e mineralizzazione dell'N (geni per proteasi).

L'applicazione di microorganismi benefici in agricoltura rappresenta, pertanto, una valida alternativa ai prodotti chimici di sintesi nelle pratiche agricole moderne e porterà al miglioramento della qualità e della fertilità dei suoli, senza incidere negativamente sulla salute umana e ambientale.

5. BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI

- Allen SE (1984). Slow release fertilizers. Nitrogen in crop production. Madison, WI, pp. 195-206.
- Bargaz A, Lyamlouli K, Chtouki M, Zeroual Y and Dhiba D (2018). Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system. *Frontiers in Microbiology* 9. Articolo n° 1606.
- Barth G, Otto R, Almeida RF, Nogueira Cardoso EJB, Cantarella H, Vitti GC (2020). Conversion of ammonium to nitrate and abundance of ammonium-oxidizing-microorganism in Tropical soils with nitrification inhibitor. *Scientia Agricola* 77 (4).
- Bevivino A (2018). I microbi del suolo: veri alleati dell'agricoltura sostenibile e della qualità degli alimenti. In: *I tempi della Terra*, No. 3, ottobre 2019. https://www.sfogliami.it/sfogliabili/187/049/i_tempi_terra_3_suolo_fphzyxk7.pdf.
- COM (2018). Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The First Clean Air Outlook. Brussels, 7.6.2018, COM (2018) 446 final. http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/clean_air_outlook.pdf.
- Decreto di legge di delegazione europea n. 81 del 30 maggio 2018 <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/07/02/18G00096/sg>.
- De Souza R, Ambrosini A and Passaglia LMP (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and Molecular Biology* 38 (4): 401-419.
- D.Lgs. 155/2010-<https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/10155dl.htm>
- D.Lgs. 81/2018 <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/07/02/18G00096/sg>
- European Environmental Agency (EEA) (2019). Air quality in Europe - 2019 report. EEA Report | No 20/2019, doi:10.2800/822355.
- FAO (1982). Application of nitrogen-fixing systems in soil management. FAO SOILS BULLETIN 49, 193pp



- Guthrie S, Giles S, Dunkerley F, Tabaqchali H, Harshfield A, Ioppolo B, Manville C (2018). In: The impact of ammonia emissions from agriculture on biodiversity. *The Royal Society Reports*. Published by the Rand Corporation (Santa Monica, Calif.) and Cambridge, UK. From. https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR2600/RR2695/RAND_RR2695.pdf.
- ISPRA, IIR (2020). Italian Emission Inventory 1990-2018. Informative Inventory Report 2020, <https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report-2017>.
- ISPRA (2018). Annuario dei dati ambientali. http://www.isprambiente.gov.it/public_files/annuario-2018.pdf.
- MIPAAF (2016). Linee guida agricole per la riduzione delle emissioni di ammoniaca nel Bacino Padano (<https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/u%252Fn%252Fi%252FD.bc2075ed7dacab0444d6/P/BLOB%3AID%3D15873/E/pdf>).
- NEC <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016L2284&from=EN>.
- PNCA (2019) https://cdr.eionet.europa.eu/it/eu/nec_revised/programmes/envxioxug.
- Protocollo di Göteborg <https://www.unece.org/environmental-policy/conventions/envlrapwelcome/guidance-documents/gothenburg-protocol.html>.
- Schloter M, Nannipieri P, Sørensen SJ, van Elsas JD (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology Fertility of Soils* 54: 1-10.
- Stamenković S, Beškoski V, Karabegović I, Lazić M, and Nikolić N (2018). Microbial fertilizers: A comprehensive review of current findings and future perspectives. *Spanish Journal of Agricultural Research* 16(1): e09R01.
- Waldrip H, Cole N, Todd R (2015). Review: Nitrogen sustainability and beef cattle feedyards: II Ammonia emissions. *The Professional Animal Scientist* 31: 395–411.



- Yu F, Nair AA, Luo G (2018). Long-term trend of gaseous ammonia over the United States: Modeling and comparison with observations. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. JRG 123(15), 8315–8325.