

PIANO DI MONITORAGGIO DEI SUOLI E DEI SISTEMI AGRICOLI

2025

RAPPORTO FINALE

1	Articolazione del piano di monitoraggio	3
2	Rete per il monitoraggio diffuso dei suoli	7
2.1	Metodica di campionamento	10
2.2	Parametri analizzati	10
2.3	RISULTATI – annualità 2025	11
2.3.1	Azoto residuale	11
2.3.1.1	Azoto - analisi statistica	13
2.3.1.2	Azoto – considerazioni finali	19
2.3.2	Fosforo residuale	21
2.3.2.1	Analisi statistica fosforo assimilabile	23
2.3.2.2	Fosforo – considerazioni finali	28
2.3.3	Conclusioni monitoraggio suolo	29
3	Rete per il monitoraggio della falda acquifera ipodermica	30
3.1	Metodica di campionamento	31
3.2	Parametri analizzati	31
3.3	RISULTATI 2025	33
3.3.1	Nitrati disciolti	33
3.3.1.1	Stazione di Desenzano – BS (APE)	35
3.3.1.2	Stazione di Leno – BS (MP)	37
3.3.1.3	Stazione di Curtatone – MN (BPE)	38
3.3.1.4	Stazione di Persico Dosimo – CR (BPC)	39
3.3.2	Fosfati disciolti	41
4	BIBLIOGRAFIA	42

1 Articolazione del piano di monitoraggio

Le attività di monitoraggio dei suoli e dei sistemi agricoli rispondono a quanto previsto dalle prescrizioni della procedura VAS a cui è stato assoggettato il Programma d'Azione per le Zone Vulnerabili ai Nitrati 2024-2027 (di seguito PdA) approvato con d.g.r. n. XII/3634 del 16 dicembre 2024. Tali attività sono estese anche alle aree del territorio regionale caratterizzate da una zootecnia intensiva non incluse nell'attuale designazione delle ZVN, in sintonia con gli obiettivi programmatici e la regolamentazione delle pratiche di fertilizzazione delle colture agricole stabilite da Regione Lombardia per tali aree.

L'obiettivo del monitoraggio è creare un modello di verifica della sostenibilità delle pratiche di fertilizzazione basato su aziende rappresentative della pianura lombarda al fine di fornire un quadro generale dello stato qualitativo dei suoli agricoli e della falda acquifera ipodermica, qualora presente.

Nello specifico gli elementi fondanti del Piano di Monitoraggio sono:

- l'individuazione di diverse tipologie aziendali (in funzione delle pratiche di fertilizzazione, di eventuali trattamenti applicati agli effluenti zootecnici, ecc.) con caratteristiche rappresentative della pianura lombarda in termini di tipologia di suolo, superficie coltivata, ordinamenti colturali, modalità di gestione;
- il campionamento dei suoli (fino a 90 punti) in post-emergenza 1 volta all'anno a 3 profondità (30-60-90 cm) per la determinazione del contenuto di nitrati (N-NO₃), azoto totale (TKN) e fosforo assimilabile (P₂O₅); inoltre, nel corso del triennio 2026-2028 verranno effettuate anche analisi di pH, conducibilità elettrica (Ec), contenuto di Carbonio organico (CO), rapporto C/N, capacità di scambio cationico (CSC), tessitura suolo e metalli pesanti;
- il campionamento periodico della falda acquifera ipodermica (profondità: 0-3 m) per la determinazione del contenuto di nitrati e fosfati tramite una ventina di piezometri. Campionamento dei suoli in prossimità dei piezometri in funzione anche dei valori di nitrato riscontrati nelle acque.

Al fine di implementare la rete di monitoraggio a scala aziendale sono state quindi individuate 6 *Focus Area* (FA):

- Alta Pianura Est (APE)
- Alta Pianura Ovest (APO)
- Media Pianura (MP)
- Bassa Pianura Est (BPE)
- Bassa Pianura Centrale (BPC)
- Bassa Pianura Ovest (BPO)

Le FA sono state delineate e caratterizzate inizialmente nel 2018 prendendo in considerazione diversi fattori agro-ambientali, tra cui la caratterizzazione pedoclimatica (a partire dalla carta pedologica prodotta da ERSAF nel 2011) (**Tabella 1**), il carico zootecnico, la Superficie Agricola Utilizzata (SAU) e le tipologie di colture partendo dall'Uso Agricolo del Suolo.

Tale suddivisione geografica delle FA rimarrà quindi in vigore per tutto il periodo di validità del Piano di Monitoraggio dei Suoli e dei Sistemi Agricoli nell'ambito del programma di sorveglianza per la verifica dell'efficacia del vigente PdA Regionale 2024-2027.

Tabella 1. Caratterizzazione dei suoli prevalenti per ciascuna FA

Denominazione FA	Caratteristiche dei suoli prevalenti
Alta Pianura Est	Caratterizzata da suoli da franco-argillosi a franco-sabbiosi con scheletro che va da comune in superficie ad abbondante in profondità, scarsamente calcarei con permeabilità moderata e drenaggio buono.
Alta Pianura Ovest	Suoli da franco-sabbiosi con scheletro comune a (in superficie) a sabbioso-franchi con scheletro abbondante in profondità, non calcarei, moderatamente profondi con permeabilità moderatamente elevata e drenaggio da moderatamente rapido a buono.
Media Pianura	Suoli franchi con substrato sabbioso senza scheletro, da scarsamente calcarei a calcarei in superficie, limitati dalla falda (mediamente tra 85 e 170 cm) con segni di idromorfica in profondità, permeabilità moderata e drenaggio lento.
Bassa Pianura Est	Suoli da franco-argillosi ad argillosi-limosi senza scheletro, alcalini e da mediamente a calcarei (talvolta fortemente calcarei con caratteri vertici), con permeabilità da moderatamente bassa a bassa e drenaggio da lento a buono. Nella valle del Po suoli da argillosi a franco- argillosi, senza scheletro, profondi con permeabilità bassa e drenaggio lento.
Bassa Pianura Centrale	Suoli franchi con substrato sabbioso senza scheletro, scarsamente calcarei: suoli profondi, limitati dalla falda profonda e/o da orizzonti sabbiosi (mediamente tra 110 e 150 cm), permeabilità moderata e drenaggio da buono a mediocre con caratteri di idromorfia.
Bassa Pianura Ovest	Suoli da franco a franco-sabbiosi, da subacidi ad acidi, non calcarei, moderatamente profondi limitati dalla falda e/o dallo scheletro abbondante (in media tra 60 e 120 cm), con permeabilità moderata e drenaggio da buono a mediocre.

Al fine di caratterizzare ulteriormente le FA di seguito si riportano:

- **Tabella 2:** in cui è riportato il carico zootecnico iniziale (2018) che ha contribuito alla definizione delle FA. Dal 2024 il carico zootecnico è stato aggiornato in base al quantitativo di azoto dichiarato nella Procedura di Gestione Nitrati dalle aziende agricole, incrociato con la consistenza zootecnica aziendale e, tenendo conto delle cessioni e acquisizioni, distribuito sulla superficie agricola utilizzata dalle singole aziende. In questo modo, quindi, con i dati aggiornati al 2025, è stato ottenuto il quantitativo totale di azoto distribuito a scala comunale che è poi stato ripartito per la SAU comunale, stimata partendo dal Piano colturale grafico delle aziende agricole di Regione Lombardia (da Sis.Co 2025); gli eventuali dati mancanti sono stati integrati utilizzando il DUSAF 2021 che ha quindi portato alla definizione dell'Uso Agricolo del Suolo (USAGR 2025). Tale aggiornamento ha determinato una consistente riduzione nel carico zootecnico rispetto ai valori stimati negli anni precedenti.
- **Tabella 3:** la SAU e le tipologie di colture per ogni FA partendo dall'Uso Agricolo del Suolo (USAGR 2025, Piano Colturale Grafico 2025 e DUSAF 2021).

Tabella 2. Caratterizzazione delle FA: carico zootecnico (kg/ha) e % SAU (DUSAF 2021– Sis.Co. 2025)

Denominazione FA	Carico di N da e.a. 2018	Carico di N da e.a. su USAGR 2025 (kg N/ha)	% SAU sul territorio 2025
Alta Pianura Est	188	138	52%
Alta Pianura Ovest	62	55	29%
Media Pianura	269	182	80%
Bassa Pianura Est	134	111	77%
Bassa Pianura Centrale	132	152	79%
Bassa Pianura Ovest	52	57	69%

Tabella 3. Caratterizzazione delle FA: % delle principali colture (DUSAF 2021 – Sis.Co. 2025)

FA	SAU (ha)	MAIS	FORAGGERE	ALTRI CEREALI	COLTURE ARBOREE	ALTRO
APE	124.811,08	28,40%	26,71%	6,47%	10,25%	28,16%
APO	73.088,04	15,52%	21,13%	9,95%	0,67%	52,72%
MP	122.836,56	41,95%	29,50%	5,75%	0,18%	22,63%
BPE	126.633,58	25,29%	26,16%	14,99%	1,22%	32,34%
BPC	127.565,90	37,96%	20,85%	10,71%	0,39%	30,09%
BPO	279.303,60	18,69%	17,40%	6,56%	4,05%	53,29%

In **Figura 1** si riporta la delimitazione delle FA che caratterizzano le aree di pianura e prima collina della Lombardia.

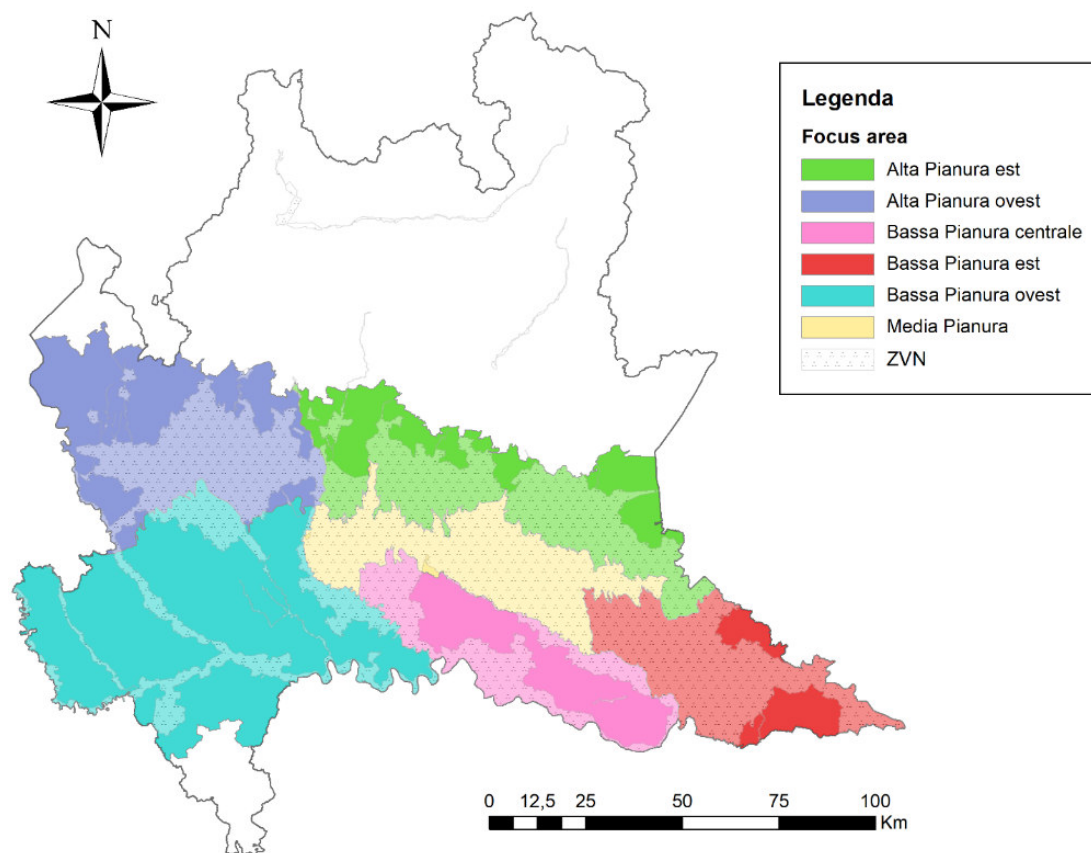


Figura 1. Delimitazione delle FA e zone vulnerabili ai nitrati (ZVN 2020) - Regione Lombardia.

Nell'ambito del programma di sorveglianza per la verifica dell'efficacia del Programma d'Azione nelle ZVN, ERSAF nel 2025 ha definito un nuovo Piano di Monitoraggio (di seguito PdM) finalizzato a valutare gli effetti conseguenti e potenziali delle pratiche agricole sullo stato di qualità delle acque così come previsto dalla Direttiva nitrati, in particolare per quanto attiene al contenuto dei nitrati e del fosforo. Ciò ha comportato il monitoraggio di alcuni indicatori chiave quali: le pratiche agricole nella loro evoluzione, la presenza di nitrati e fosforo nei suoli coltivati in post raccolta e la loro concentrazione nelle falde ipodermiche.

L'impostazione dello schema di monitoraggio si fonda su 2 azioni complementari:

1. Il campionamento dei suoli eseguito in circa 90 punti di monitoraggio/anno a diverse profondità (vedi § 2).
2. Il campionamento della falda acquifera ipodermica (profondità 0-3 m) eseguito attraverso il prelievo di campioni di acqua tramite una rete di piezometri (vedi § 3).

2 Rete per il monitoraggio diffuso dei suoli

In continuità con lo schema di monitoraggio sviluppato e realizzato per il precedente PdA, è stata eseguita una selezione di aziende oggetto dell'attività di monitoraggio attraverso l'identificazione della tipologia e dei quantitativi di effluenti e fertilizzanti minerali distribuiti a livello delle diverse Focus Area. Il parametro chiave intorno al quale è stata impostata tale selezione è costituito dalla tipologia di matrice distribuita, al fine di ottenere una rete di monitoraggio rappresentativa delle pratiche di fertilizzazione per ciascuna FA. Pertanto, la rete preesistente è stata modellata e integrata con nuovi punti per rispettare i rapporti tra le diverse matrici prese in considerazione: effluente bovino, effluente suino, digestato, fanghi di depurazione; a queste si aggiungono i fertilizzanti minerali che, in alcune aree del territorio lombardo, costituiscono il maggior apporto di azoto.

L'obiettivo definito nel PdM consiste nel monitorare circa 90 punti/anno campionati 1 volta all'anno, in post-raccolta nel periodo agosto-ottobre. Poiché il campionamento deve essere eseguito in assenza di coltura attiva, le concentrazioni che vengono misurate rappresentano il nitrato residuale non più soggetto ad assorbimento radicale.

Nella **Tabella 5** sono riportati il numero di punti campionati nell'anno 2025 in funzione della matrice fertilizzante nelle diverse Focus Area, mentre nella **Tabella 5** si riporta il totale di campioni raccolti nell'anno 2025 in funzione della profondità di suolo raggiunta.

Tabella 4. Ripartizione dei punti campionati gestiti con matrici diverse nelle diverse FA

Focus Area	BOVINI	MINERALE	SUINI	BIOGAS	FANGHI	Totale complessivo
Alta Pianura Est	9	1	2	3	0	15
Alta Pianura Ovest	5	4	1	1	1	12
Media Pianura	6	1	3	4	0	14
Bassa Pianura Est	7	1	4	2	0	14
Bassa Pianura Centrale	6	2	3	3	1	15
Bassa Pianura Ovest	5	8	3	1	3	20
Totale complessivo	38	17	16	14	5	90

Tabella 5. Numero totale di campioni raccolti nel 2025 alle diverse profondità del suolo

ANNUALITÀ	PERIODO	profondità	profondità	profondità
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
2025	POST-RACCOLTA	90	90	79

Oltre al carico medio di azoto da effluenti di allevamento riportato in **Tabella 2**, per ogni Focus Area è stato calcolato anche il carico medio di azoto (dato dalla somma tra azoto minerale, azoto da effluenti di allevamento e azoto proveniente da altre matrici, come fanghi o componente vegetale immessa negli impianti a biogas) che le aziende oggetto del monitoraggio hanno dichiarato di distribuire nella Comunicazione Nitrati presentata nel 2025. Il valore di azoto utilizzato, per tanto, è il totale, che non tiene conto dell'efficienza delle diverse matrici. Per quanto riguarda il fosforo, invece, è stato utilizzato il valore del fosforo efficiente di origine zootecnica che è possibile scaricare dalla Comunicazione Nitrati

ripartito sulla SAU aziendale. I valori medi per ogni Focus Area sono riportati nella **Tabella 6**.

Tabella 6: Azoto medio distribuito e fosforo efficiente zootecnico distribuito nelle diverse FA dalle aziende oggetto del monitoraggio.

Focus Area	N totale (kg/ha)	Fosforo efficiente zootecnico (kg/ha)
Alta pianura est	478	153
Alta pianura ovest	297	48
Bassa pianura centrale	343	110
Bassa pianura est	284	68
Bassa pianura ovest	249	27
Media pianura	360	88

La localizzazione dei punti di monitoraggio dell'anno 2025 e la relativa ripartizione tra ZVN e ZnVN sono riportati in **Figura 2** e **Figura 3**; in **Figura 4** sono indicate le principali tipologie di colture praticate sui campi monitorati ripartiti in ZVN e ZnVN.

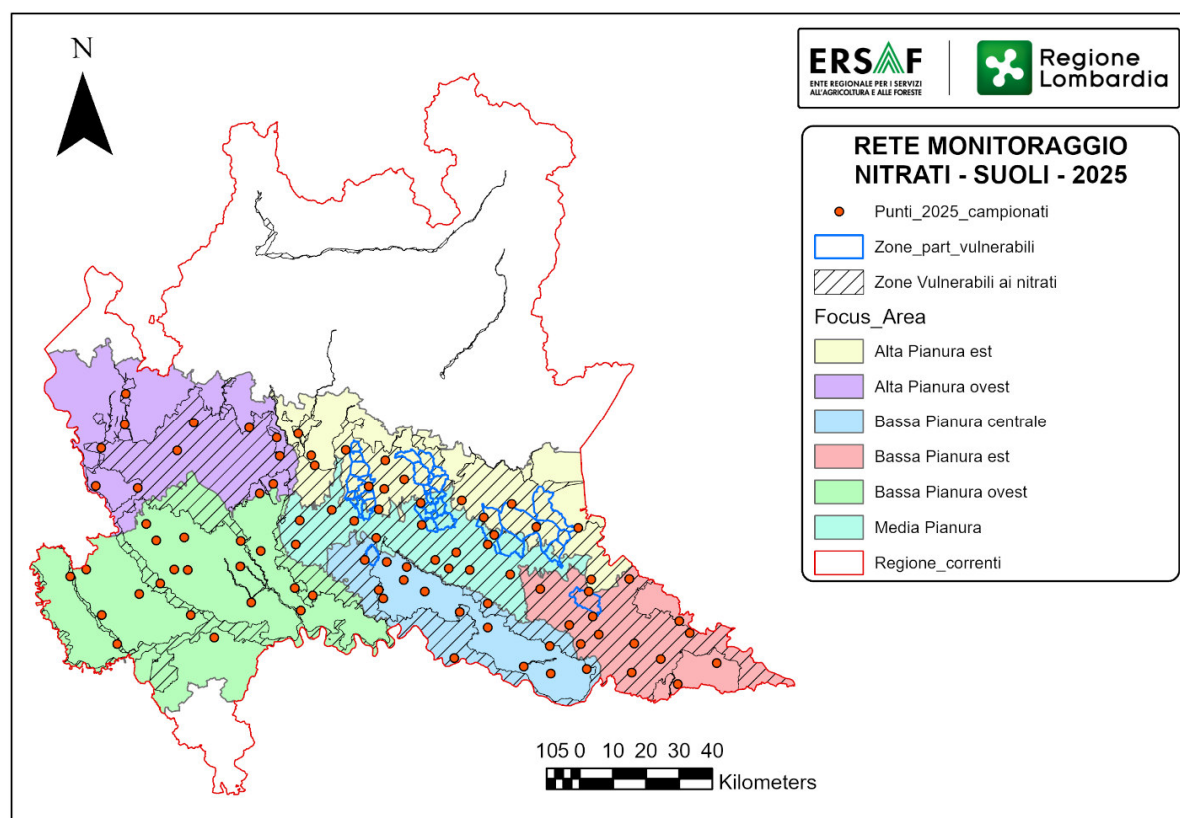


Figura 2. Localizzazione dei punti di campionamento oggetto del monitoraggio dei suoli nel 2025.

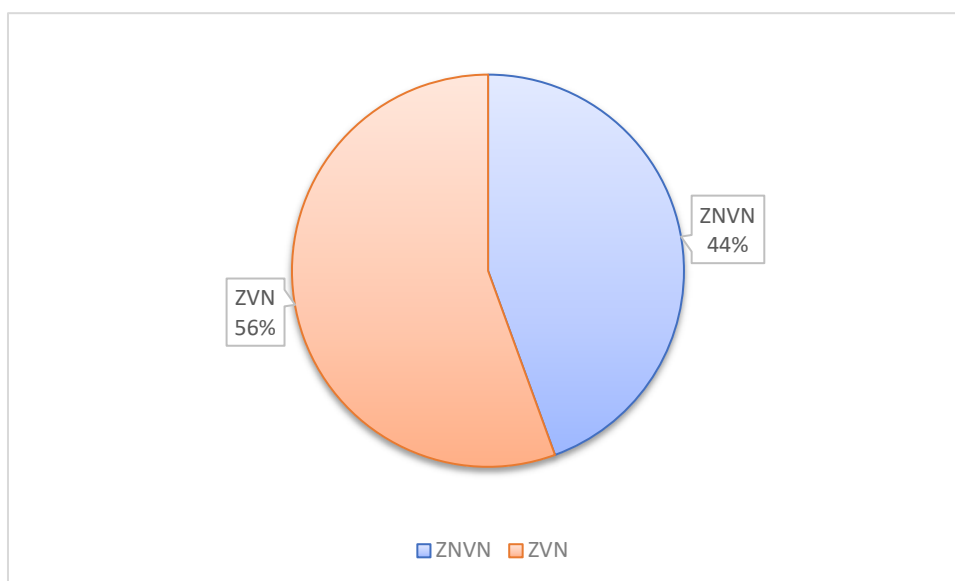


Figura 3. Ripartizione % dei campioni eseguiti nel 2025 in ZVN e ZnVN.

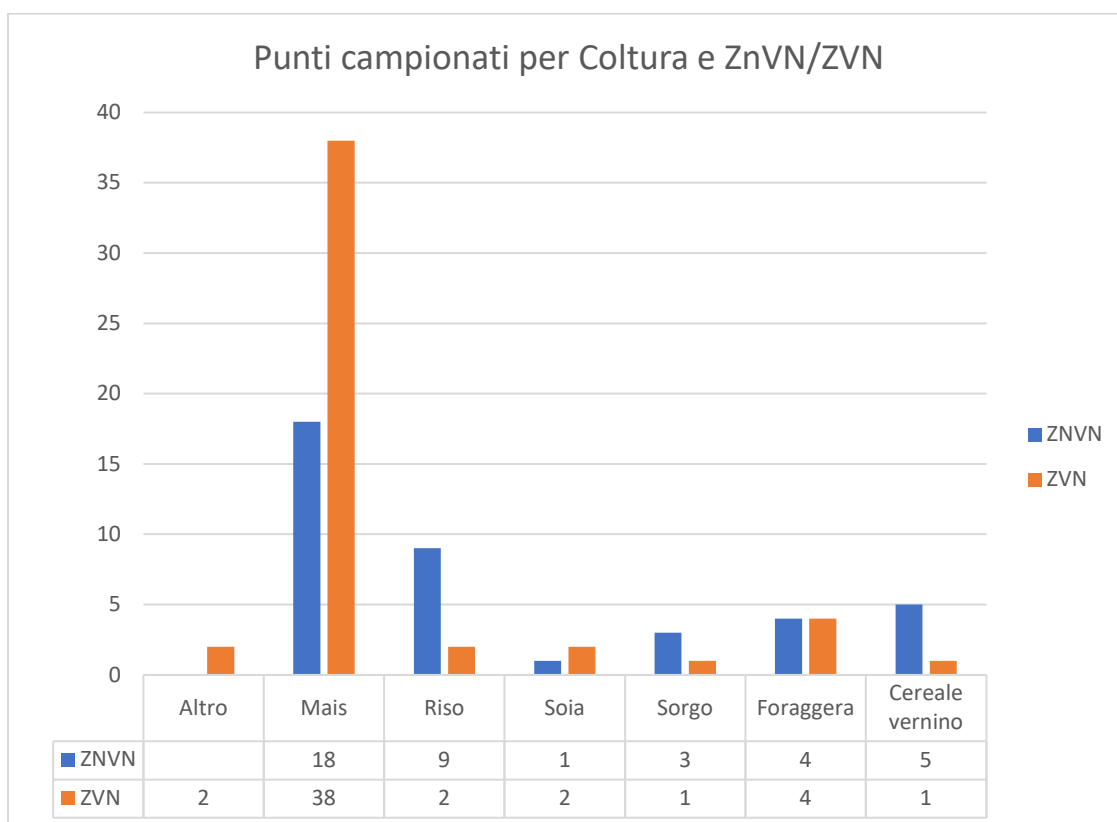


Figura 4. Ripartizione delle colture praticate sui campi campionati ripartiti tra ZVN e ZnVN nel 2025.

2.1 Metodica di campionamento

Il campionamento dei suoli è stato eseguito secondo le modalità previste dal Decreto Ministeriale del 13/09/1999 “Metodi ufficiali di analisi chimica del suolo” e successive modifiche, mediante un posizionamento dei punti di prelievo di tipo non sistematico a X, evitando i bordi dei campi e tutte le eventuali situazioni non rappresentative dell’area nel suo complesso; inoltre, il prelievo dei campioni di suolo nello strato superficiale è avvenuto dopo aver asportato il cotico erboso/residui colturali e gli eventuali frammenti grossolani eccedenti i 2 cm di diametro.

In ogni area di campionamento, utilizzando una trivella manuale di tipo olandese, sono quindi stati prelevati 5 campioni elementari che, in seguito a miscelazione e omogeneizzazione, sono andati a costituire “campioni compositi” per 3 diverse profondità (laddove possibile):

- 0-30 cm
- 30-60 cm
- 60-90 cm

Da ciascuno di tali campioni compositi è stato ricavato circa 1 kg di terreno, trasportato in sede, stoccato in congelatore e successivamente consegnato al laboratorio di analisi esterno.

2.2 Parametri analizzati

Come definito nel PdM, le determinazioni analitiche eseguite sui campioni di suolo hanno riguardato il contenuto di nitrati (azoto nitrico [NO₃-N]), azoto totale (metodo Kjeldahl - TKN) e fosforo disponibile [P₂O₅] per ognuna delle tre profondità; inoltre, anche la determinazione del contenuto di carbonio organico (CO) (e il conseguente rapporto C/N) è stata oggetto delle analisi eseguite in tutti i punti di campionamento.

Nella seguente **Tabella 7** si riportano i metodi di analisi chimica e fisica applicati dal laboratorio di analisi.

Tabella 7. *Elenco delle determinazioni analitiche e dei relativi metodi utilizzati*

PARAMETRO	METODO
Sostanza secca (Residuo secco a 105 °C)	CNR IRSA 2 Q 64 Vol 2 1984
Carbonio organico (come C)	DM 13/09/1999 SO n 185 GU n 248 21/10/1999 Met. VII.2
Azoto totale (come N)	DM n°185 13/09/1999 S.O.GU n°248 21/10/99 Met. XIV.2 + DM n°185 13/09/1999 S.O.GU n°248 21/10/99 Met. XIV.3
Azoto nitrico (come N)	EPA 9056A 2007
Fosforo assimilabile (come P ₂ O ₅)	D.M. n° 185 del 13/09/99 SO G.U. n° 248 del 21/10/99 Metodo XV.3 + UNI EN ISO 11885:2009

2.3 RISULTATI – annualità 2025

Nel presente paragrafo si riportano i principali risultati ottenuti dall'attività di monitoraggio dei suoli nell'ambito della campagna di campionamento 2025.

2.3.1 Azoto residuale

Nella **Tabella 8** sono riportati i dati di sintesi relativi al contenuto medio ($\pm$ *deviazione standard*) di azoto nitrico ($\text{NO}_3\text{-N}$) nei suoli, suddivisi per *Focus Area* (FA) e in funzione delle diverse profondità di campionamento in post-raccolta nel 2025.

Tabella 8. Concentrazione media ($\pm$ SQM) di $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/kg) residuale per FA a diverse profondità in post-raccolta 2025

Focus Area	Media e deviazione standard di N-NO_3 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Alta Pianura Est	22,51 $\pm$ 16,64	17,29 $\pm$ 22,59	7,06 $\pm$ 2,93
Alta Pianura Ovest	6,55 $\pm$ 3,48	5,74 $\pm$ 3,92	3,57 $\pm$ 2,39
Media Pianura	12,86 $\pm$ 7,89	9,94 $\pm$ 5,5	5,7 $\pm$ 4,4
Bassa Pianura Est	14,94 $\pm$ 6,97	13,53 $\pm$ 8,48	7,57 $\pm$ 3,92
Bassa Pianura Centrale	14,98 $\pm$ 8,31	9,16 $\pm$ 4,15	6,48 $\pm$ 7,71
Bassa Pianura Ovest	7,17 $\pm$ 5,32	3,56 $\pm$ 1,77	2,97 $\pm$ 2,27
Totale Pianura	13,04 $\pm$ 10,39	9,61 $\pm$ 11,1	5,34 $\pm$ 4,7

Si può notare come in tutte le FA le concentrazioni di azoto nitrico presentano valori mediamente bassi, con trend in diminuzione scendendo in profondità. I valori più elevati sono stati riscontrati nella zona orientale della pianura (caratterizzata da una maggiore incidenza del settore zootecnico); nella Bassa Pianura Ovest (prevalentemente caratterizzata dalla coltivazione del riso) si riscontrano, invece, i valori più bassi per ciascuna profondità con una certa costanza lungo il profilo.

Tali esiti risultano in linea con i dati pregressi, confermando che, in generale, i suoli agricoli della pianura non presentano un contenuto di nitrati preoccupante; occorre però sottolineare che, anche in questa campagna di monitoraggio tutto il dataset è caratterizzato da una notevole variabilità, dovuta prevalentemente all'adozione di sistemi di gestione agronomica differenti, alle diverse matrici utilizzate per la fertilizzazione, alle diverse colture praticate e, soprattutto, ai differenti input di azoto.

Il contenuto di nitrati del suolo può fornire utili informazioni sia sul rischio potenziale di lisciviazione di nitrati (non assorbiti dalla coltura), sia sul grado di efficienza di utilizzazione dell'azoto in termini gestionali. Sullivan e Cogger (2003) hanno ipotizzato 3 possibili intervalli di concentrazioni di $\text{NO}_3\text{-N}$ cui corrispondono differenti consigli sulla gestione dell'azoto (**Tabella 9**).

Tabella 9. Possibili intervalli di concentrazioni di $\text{NO}_3\text{-N}$ secondo Sullivan e Cogger (2003)

	$\text{NO}_3\text{-N}$ Mg/kg	Suggerimenti di gestione
Classe I	< 20	Continuare con il piano di concimazione attuale.
Classe II	20 - 45	Ridurre la concimazione in copertura nella stagione successiva, utilizzando il test dell'azoto nitrico in copertura effettuato tra la 4-6 foglia (15-30 cm per il mais) per decidere il quantitativo di azoto da apportare. Non apportare più del 125% dell'azoto asportato mediamente della coltura. Ridurre del 10-25% la quantità di N organico apportata.
Classe III	> 45	Non effettuare la concimazione in copertura nell'anno successivo, ridurre i quantitativi di N organico in presemina. Apportare azoto non superiore alla quantità asportata mediamente della coltura. Ridurre del 20-40% la quantità di N organico apportata.

In **Figura 5** sono rappresentati i siti di campionamento (n. totale 90) suddivisi secondo l'appartenenza alle classi di Sullivan e Cogger, in funzione del contenuto di azoto nitrico nell'orizzonte superficiale (0-30 cm) in post-raccolta 2025: la maggioranza dei siti monitorati (ca. 74%) ricade nella Classe I, mentre nelle zone centrali della pianura risultano concentrati la maggior parte di quelli ricadenti in Classe II (ca. 25%); infine, solo 2 punti ricadono in Classe III, in APE.

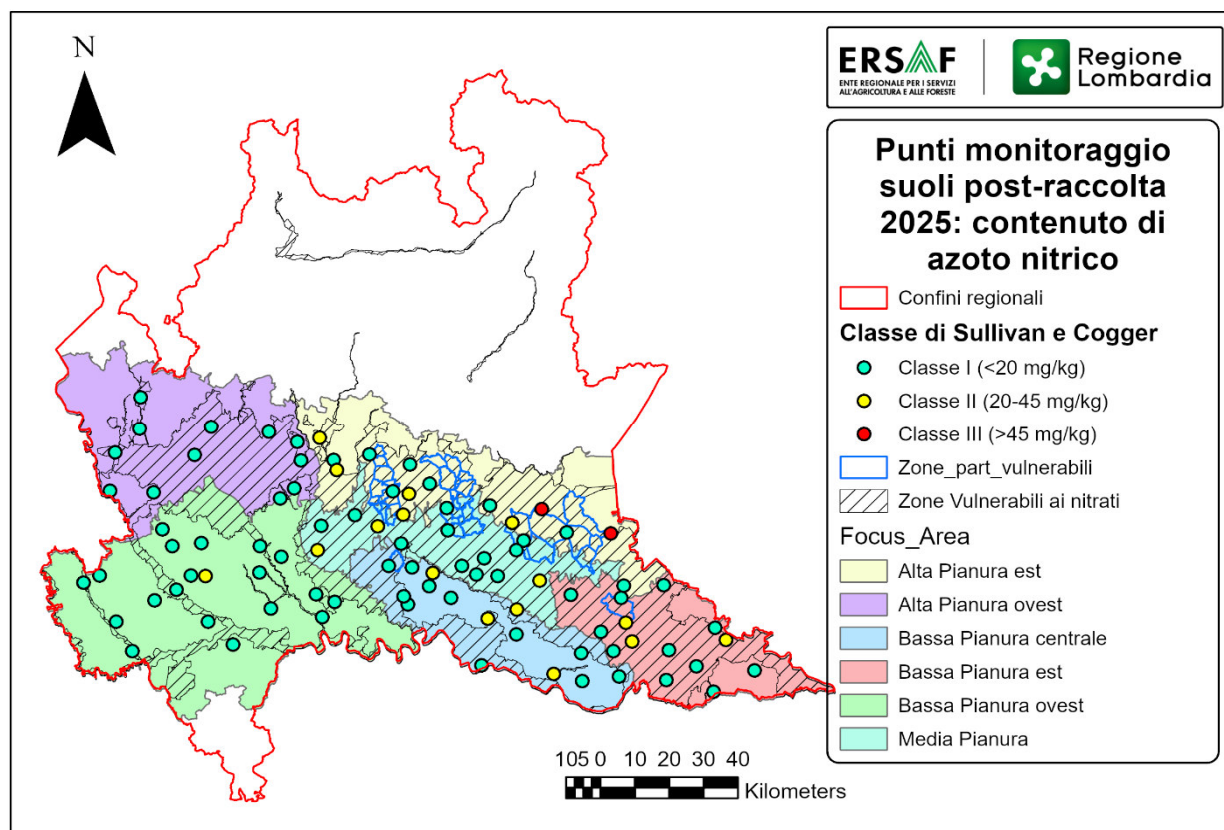


Figura 5. Carta del contenuto di $\text{NO}_3\text{-N}$ nel primo strato di suolo (0-30 cm) nelle diverse FA in post-raccolta 2025, in relazione all'appartenenza alle classi di Sullivan e Cogger (**Tabella 9**).

2.3.1.1 Azoto - analisi statistica

Nel presente paragrafo si riportano alcune elaborazioni statistiche relative ai risultati ottenuti con riferimento ai punti di campionamento del suolo e alle rispettive aziende agro-zootecniche, selezionate in base alle differenti matrici fertilizzanti in ciascuna FA (*Tabella 4*).

Per comprendere meglio alcune dinamiche e correlazioni tra i dati analitici riscontrati, è stata eseguita l'analisi statistica con il metodo Kruskal-Wallis.

La scelta di tale metodo si è resa necessaria in quanto la distribuzione delle osservazioni non rispetta gli assunti di normalità ed omogeneità delle varianze e, per un'analisi più dettagliata, è stato applicato il test post hoc di Dunn con correzione Bonferroni per i confronti pairwise.

Sigle utilizzate

ρ : Rho di Spaerman, coefficiente di correlazione non parametrico che misura l'intensità e la direzione dell'associazione tra due variabili (valore compreso tra -1 e +1).

p: significatività di una correlazione; spiega se la relazione osservata tra due variabili è statisticamente reale o frutto del caso ($p < 0,05$ = correlazione significativa).

R^2 : misura statistica che indica quanta parte della varianza della variabile dipendente (Y) è spiegata dalla variabile indipendente (X) in un modello di regressione lineare.

a) Azoto e profondità

Nel **Grafico 1**, si riportano i box plot con i valori di N nitrico lungo il profilo (0-90 cm) ripartiti per profondità di campionamento; le lettere (a-b-c) indicano le differenze significative tra le FA:

- nello strato superficiale (0-30 cm), Bassa Pianura Ovest e Alta Pianura Ovest si differenziano nettamente dalle FA situate ad est della regione mentre Media Pianura non mostra differenze significative con alcuna delle altre FA;
- nello strato intermedio (30-60 cm) si osserva una netta differenza tra Alta Pianura Est e Bassa Pianura Ovest, mentre le altre FA mostrano un gradiente di diminuzione muovendosi da est a ovest;
- nello strato più profondo (60-90 cm) le FA situate ad est differiscono significativamente solamente dalla Bassa Pianura Orientale.

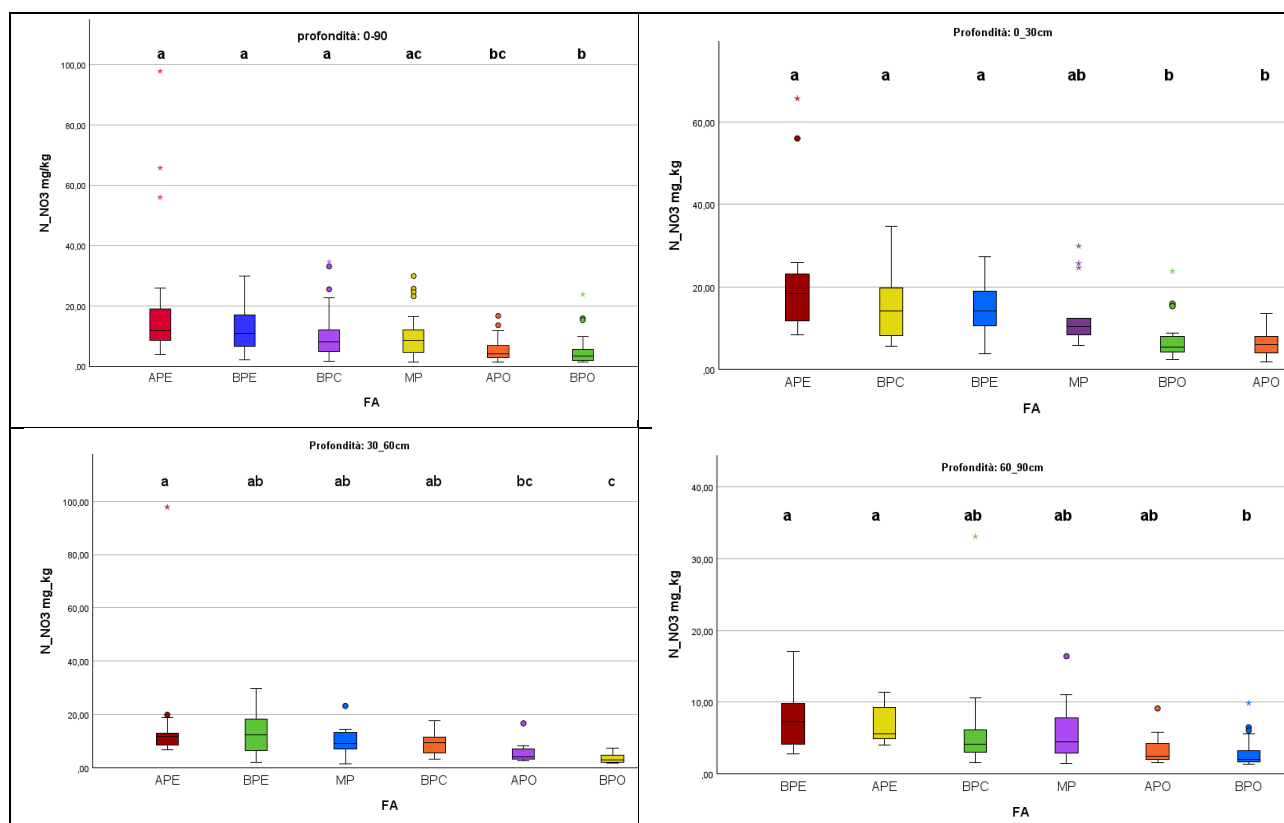


Grafico 1. Analisi del contenuto di azoto nitrico alle diverse profondità campionate.

È stata, inoltre, analizzata l'interazione tra profondità e Focus Area per verificare se la diminuzione di azoto nitrico lungo il profilo fosse un comportamento riscontrabile in tutte le FA (**Grafico 2**).

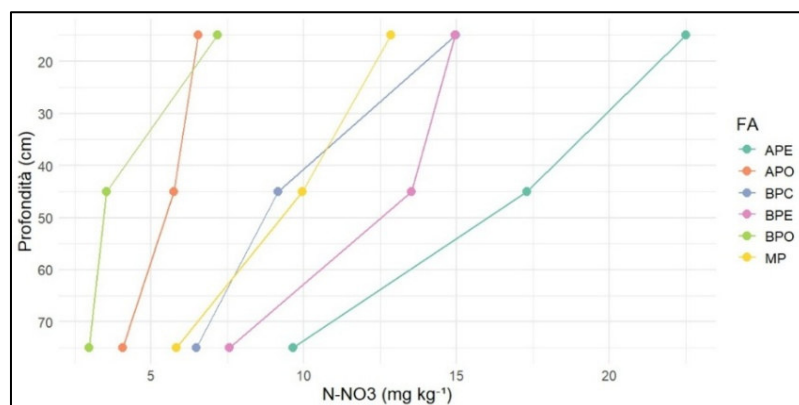


Grafico 2. Dinamica del nitrato per FA in funzione della profondità.

Le concentrazioni di nitrati sono indirettamente proporzionali alla profondità, diminuiscono significativamente all'aumentare della profondità ($p < 0,001$) con delle differenze significative tra le FA ($p < 0,001$). Tuttavia, l'interazione profondità $\times$ FA non è risultata significativa ($p = 0,28$). Il modello, pertanto, ci suggerisce che passando da uno strato superficiale ad uno più profondo il contenuto di nitrato diminuisce in modo statisticamente non differente tra le varie FA.

Non si ha, quindi, evidenza che una Focus Area trattenga o liscivi nitrato diversamente in funzione della profondità.

b) Azoto e matrice

Nella **Tabella 10** si possono osservare la media e la deviazione standard di azoto nitrico relative alle diverse matrici distribuite per profondità di campionamento che sono, poi, state utilizzate per la successiva analisi statistica.

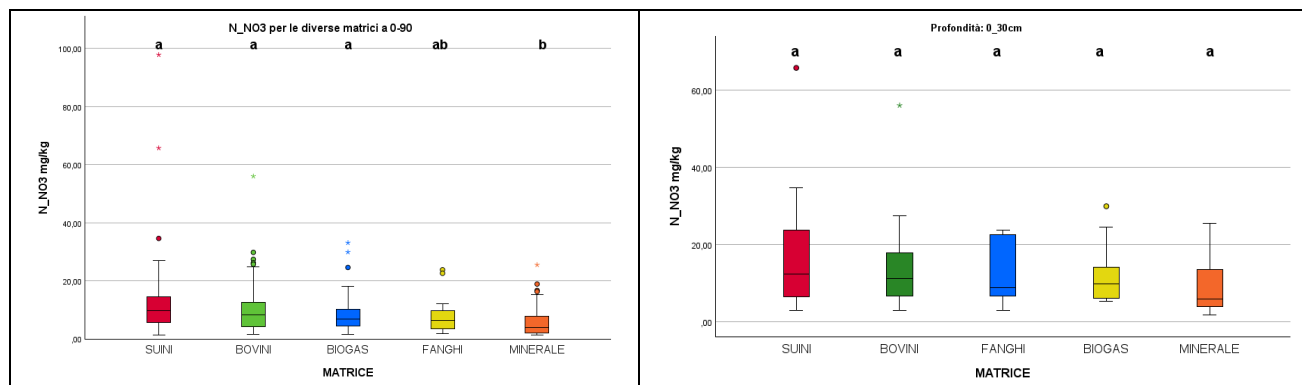
Tabella 10: Concentrazione media ($\pm$ SQM) di $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/kg) residuale per matrice a diverse profondità in post-raccolta 2025.

Matrice	Media e deviazione standard di N-NO_3 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
BIOGAS	12 $\pm$ 7,35	7,96 $\pm$ 4,26	6,67 $\pm$ 8,15
BOVINI	13,7 $\pm$ 9,62	10,21 $\pm$ 7,02	5,52 $\pm$ 3,76
FANGHI	12,93 $\pm$ 9,61	6,59 $\pm$ 3,52	5,05 $\pm$ 3,52
MINERALE	8,75 $\pm$ 6,75	5,24 $\pm$ 4,11	2,81 $\pm$ 1,79
SUINI	16,98 $\pm$ 15,88	15,25 $\pm$ 22,58	6,58 $\pm$ 4,44

L'analisi statistica tra azoto nitrico e le diverse tipologie di matrici distribuite mostra come, prendendo in considerazione l'intero profilo di suolo (0-90 cm) ci siano differenze significative ($p < 0,001$) tra il concime minerale e le altre matrici.

Dall'osservazione del Grafico 3, si osserva:

- assenza di significatività nelle differenze tra le matrici ($p = 0,143$) nello strato superficiale (0-30 cm);
- presenza di significatività nelle differenze tra le matrici nei campi in cui sono state distribuite effluenti di origine zootecnica (suini e bovini) rispetto ai concimi minerali negli strati intermedio e profondo; l'azoto residuale nel suolo (30-90 cm) risulta significativamente inferiore laddove sono stati utilizzati fertilizzanti di sintesi, rispetto alle matrici di origine zootecnica;
- assenza di differenze significative nei campi distribuiti a fanghi e biogas rispetto alle altre matrici.



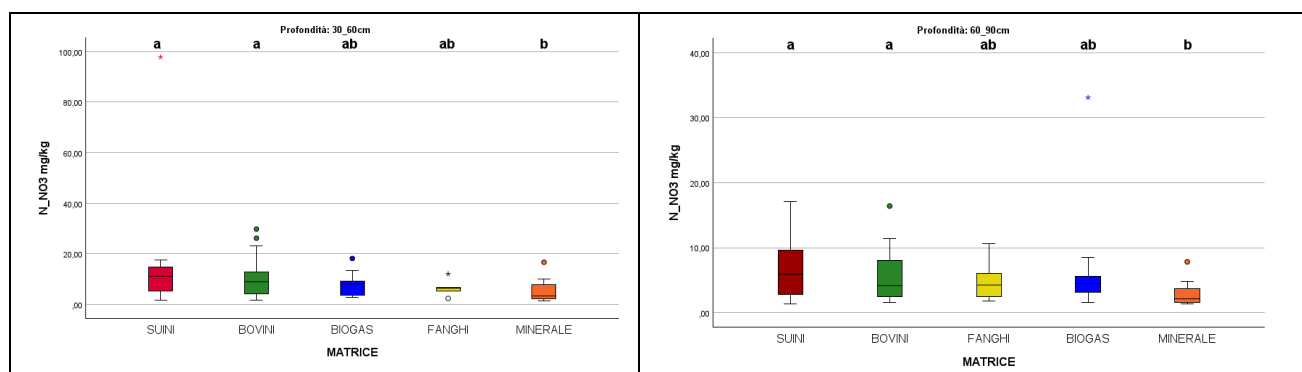


Grafico 3: Variabilità dell'azoto nitrico in funzione della matrice fertilizzante distribuita e alle diverse profondità.

c) Azoto e coltura

Un'altra analisi ha preso in considerazione la variabilità del contenuto di azoto nitrico in funzione della coltura praticata sul campo oggetto del campionamento.

In **Tabella 11**, si possono osservare le medie di azoto nitrico residuale per profondità in funzione della coltura presente sul campo durante le operazioni di campionamento.

Tabella 11: Concentrazione media ($\pm$ SQM) di $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/kg) residuale per coltura a diverse profondità in post-raccolta 2025.

Colture	Focus Area	Media di N-NO_3 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Altre colture	Alta pianura ovest	$5,23 \pm 1,98$	$6,05 \pm 2,73$	$3,46 \pm 1,28$
	Bassa pianura est	$16,3 \pm 0,85$	$17,55 \pm 0,92$	$9,15 \pm 0,94$
Mais-sorgo	Alta pianura est	$22,88 \pm 17,21$	$17,64 \pm 23,4$	$7,06 \pm 2,93$
	Alta pianura ovest	$5,93 \pm 1,88$	$3,9 \pm 0,99$	$2,93 \pm 1,66$
	Media pianura	$12,86 \pm 7,89$	$9,94 \pm 5,50$	$5,70 \pm 4,40$
	Bassa pianura est	$16,65 \pm 8,36$	$11,59 \pm 9,52$	$6,65 \pm 2,69$
	Bassa pianura centrale	$14,98 \pm 8,62$	$8,98 \pm 4,25$	$6,65 \pm 7,97$
	Bassa pianura ovest	$8,56 \pm 4,01$	$4,91 \pm 1,61$	$4,03 \pm 2,12$
Riso	Bassa pianura ovest	$4,51 \pm 1,69$	$2,28 \pm 0,55$	$1,66 \pm 0,24$
Cereale autunno vernino	Alta pianura est	17,30	12,40	-
	Alta pianura ovest	13,60	17,64	-
	Bassa pianura est	$12,45 \pm 0,07$	$9,3 \pm 3,83$	$11,52 \pm 7,89$
	Bassa pianura ovest	$14,82 \pm 12,7$	$12,7 \pm 5,55$	$2,77 \pm 0,35$
Foraggera	Alta pianura est	$6,88 \pm 7,11$	$5,33 \pm 2,81$	$5,32 \pm 5,38$
	Alta pianura ovest	$11,72 \pm 8,48$	$18,2 \pm 10,35$	$6,03 \pm 4,69$
	Bassa pianura centrale	15,00	11,70	4,10
	Bassa pianura ovest	$10,69 \pm 7,37$	$5,21 \pm 2,17$	$7,73 \pm 30$

Come si osserva nel **Grafico 4**, si sono riscontrate differenze significative ($p < 0,001$) tra le varie tipologie culturali considerate.

Considerando tutto il profilo 0-90 cm, è possibile notare come i campioni raccolti in campi coltivati a riso evidenzino un contenuto di $N-NO_3$ significativamente inferiore rispetto a tutte le altre colture. Passando all'analisi strato per strato, si osserva come il riso mantenga sempre un contenuto di azoto nitrico più basso a tutte le profondità.

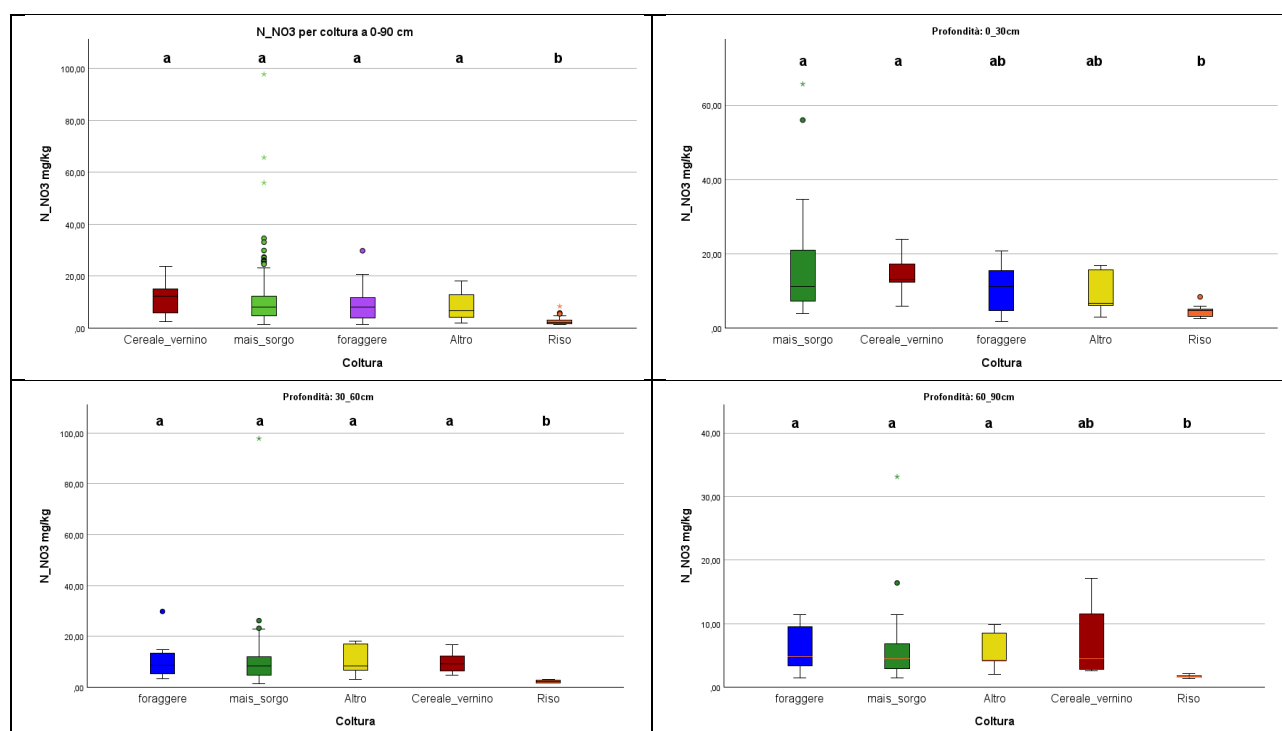


Grafico 4: Analisi del contenuto di NO_3-N e in funzione della tipologia di coltura presente al momento del campionamento in post-raccolta 2025.

In funzione di quanto osservato, si può affermare che:

- la prevalenza delle aziende risicole selezionate non ha allevamenti (7 su 11) e la principale fonte azotata è di origine minerale; quindi, si riscontra una coerenza con le correlazioni tra matrici/N residuale;
- il contesto aziendale legato alle colture diverse dal riso è prevalentemente associato ad un sistema agro-zootecnico con un maggiore utilizzo di matrici organiche.

Se l'azoto minerale, quindi è un concime a "pronto effetto" o, comunque apportato alle colture quando serve per favorirne lo sviluppo, l'azoto di origine organica risulta avere una maggiore permanenza nel suolo e un rilascio più lento di azoto a seguito anche dei fenomeni di mineralizzazione della sostanza organica a cui questo elemento è legato.

d) Azoto e tessitura

L'analisi statistica condotta in funzione della tessitura dei suoli ha mostrato differenze significative considerando, nel suo insieme, l'intero profilo 0-90 cm ($p < 0,001$). Analizzando i singoli strati, invece, si osserva che:

- a 0-30 cm non si osservano differenze significative ($p = 0,209$);

- a 30-60 cm e 60-90 cm si osservano differenze significative ($p=0,003$ e $p < 0,001$).

L'analisi della correlazione di Spearman tra concentrazione di N-NO₃ e classe tessiturale ha evidenziato una relazione positiva significativa considerando l'intero profilo ($\rho = 0,322$; $p < 0,001$). Si osserva, pertanto, un aumento della concentrazione di nitrato verso le tessiture caratterizzate da materiale più fine (da suoli sabbiosi a suoli argillosi).

Nel **Grafico 5**, inoltre si evince che l'intensità della relazione varia con la profondità: nello strato superficiale; infatti, non si osserva una differenza significativa tra le diverse tessiture mentre diventa significativa e progressivamente più marcata negli strati più profondi ($\rho = 0,333$ a 30–60 cm; $\rho = 0,440$ a 60–90 cm).

Infine, l'analisi statistica della classe di tessitura argillosa è poco rappresentativa, avendo a disposizione solo 4 ripetizioni e per questo motivo alla profondità 60-90 cm, il test statistico non è in grado di differenziare in modo significativo il suo comportamento rispetto alle altre classi tessiture.

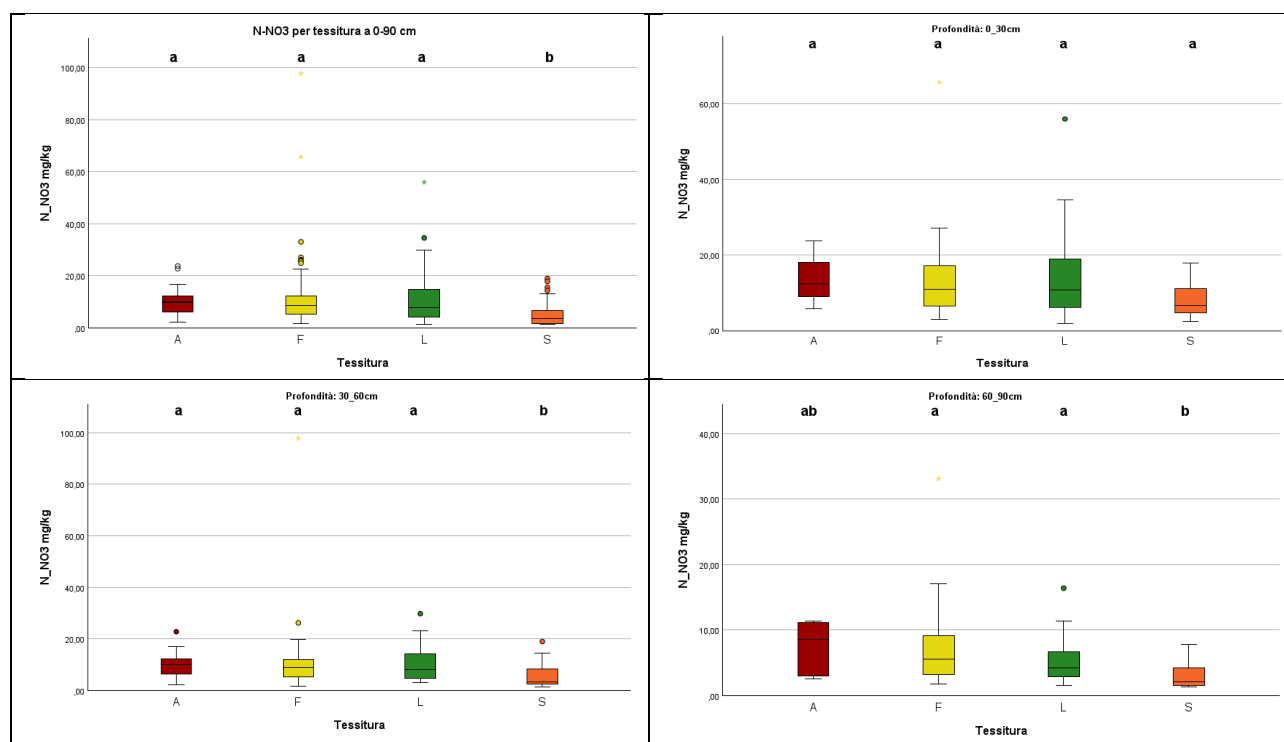


Grafico 5: Analisi del contenuto di azoto nitrico alle diverse profondità in funzione della tessitura.

e) Azoto e fertilizzazione

Il **Grafico 6** mette in relazione il contenuto di N-NO₃ in ciascuna FA con il carico medio aziendale oggetto di monitoraggio.

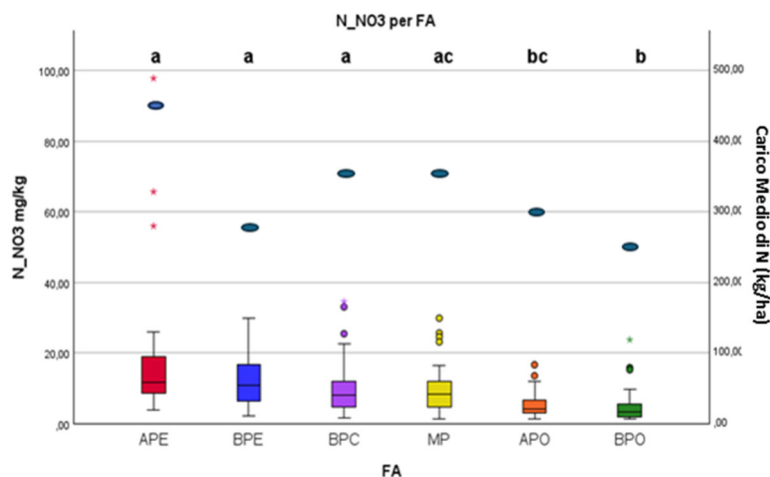


Grafico 6: Concentrazione di azoto nitrico nello strato 0-90 cm per FA e carico medio di azoto totale della FA dichiarato in Comunicazione Nitrati da ciascuna aziende rappresentato dagli ovali blu (valori riportati in **Tabella 6**).

Si osserva che:

- la BPO ha sia il carico medio di azoto totale (248 kg N/ha) sia il valore di N-NO₃ residuale (4,56 mg/kg) più basso tra tutte le FA;
- l'APE, invece, ha sia il carico medio di azoto totale (457 kg N/ha) sia il valore di N-NO₃ (17 mg/kg) residuale più alto tra tutte le FA.

2.3.1.2 Azoto – considerazioni finali

L'analisi statistica ha preso in considerazione ciascuna variabile in modo indipendente; tuttavia, si possono fare alcune considerazioni complessive.

La campagna di monitoraggio è stata pianificata in modo da selezionare le aziende al fine di ottenere un campione che sia il più rappresentativo possibile per ciascuna FA.

I risultati della prima campagna di monitoraggio con questa metodica di campionamento hanno evidenziato differenze significative tra le varie FA:

- la BPO presenta il contenuto medio nei suoli di N-NO₃ più basso mentre l'APE ha evidenziato i valori più elevati;
- nei suoli coltivati a riso, concentrati nella BPO, si osservano le concentrazioni minore di N-NO₃;
- la BPO è l'area in cui prevale l'utilizzo di concime minerale rispetto all'azoto zootecnico;
- alla tessitura sabbiosa dei suoli, che caratterizza principalmente la BPO, è associata una minore presenza di N-NO₃.

Da queste evidenze, si può affermare che:

- la prevalenza di utilizzo di concime minerale, fornendo azoto prontamente disponibile durante il ciclo colturale, si traduce in concentrazioni nitrato residuale ridotte anche negli strati profondi (60-90 cm), confermando una maggiore efficienza di utilizzo;
- le matrici fertilizzanti organiche, che hanno una maggiore permanenza nel suolo e un rilascio più lento di azoto a seguito della mineralizzazione della sostanza organica si traducono in quantità maggiori di azoto nitrico nel suolo in post-raccolta;
- la tipologia di fertilizzazione ha effetti anche in profondità e non solo negli orizzonti più superficiali;
- negli strati superficiali del suolo la concentrazione di nitrato è maggiormente influenzata da fattori gestionali, mentre negli orizzonti più profondi la tessitura assume un ruolo determinante nel modulare la mobilità e l'accumulo del nitrato, con implicazioni rilevanti in termini di rischio di lisciviazione.

Per capire quali siano i fattori che maggiormente influenzano il contenuto di $N-NO_3$ nel suolo è stata eseguita un'apposita analisi. Di seguito si riportano i risultati nel **Grafico 7**.

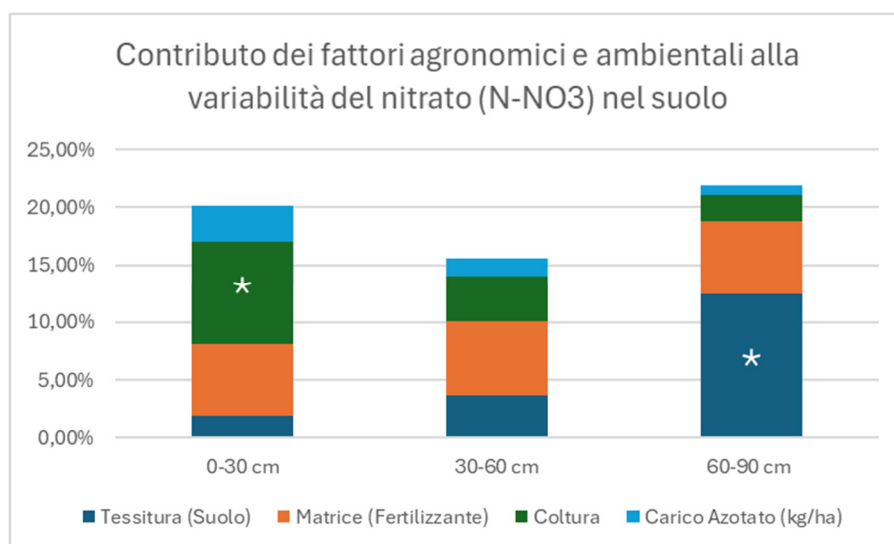


Grafico 7: Variabili che influenzano il contenuto di azoto nitrico alle diverse profondità.

Il modello raggiunge un valore di R^2 totale compreso tra il 15,6% e il 22%. In termini predittivi, ciò significa che le variabili inserite (Tessitura, Carico N, Coltura e Matrice) riescono a spiegare circa un quinto della variabilità totale del contenuto di nitrato. La restante quota (circa 80%) è da attribuirsi a fattori ambientali (precipitazioni, temperatura) e altre variabili gestionali puntuali (irrigazione).

Strato 0-30 cm: il driver principale è la **Coltura** ($\Delta R^2 = 8,9\%$). La significatività riscontrata (specialmente per il riso, $p = 0,025$) indica che le asportazioni colturali e la gestione agronomica della coltura sono le principali variabili predittive dei livelli superficiali di azoto.

Strato 30-60 cm: non ci sono variabile predittive in grado di spiegare in modo significativo la variabilità del contenuto in nitrato.

Strato 60-90 cm: la capacità predittiva è dominata dalla **Tessitura** del suolo ($\Delta R^2 = 12,5\%$), con una significatività statistica estremamente solida ($p = 0,001$). Questo conferma che, negli strati profondi, la fisica del terreno è un predittore molto più affidabile rispetto alla gestione agronomica superficiale.

2.3.2 Fosforo residuale

Per quanto riguarda il contenuto di fosforo nel suolo, è stata eseguita l'analisi del fosforo assimilabile presente in soluzione attraverso il metodo Olsen che permette di determinare il quantitativo biodisponibile e quindi la quantità di fosforo utilizzabile dalle colture vegetali. In generale, si può affermare che per la maggior parte delle colture, soprattutto se in suoli neutri-alcalini comunemente presenti nel territorio di pianura della Lombardia, il range 12-30 mg/kg di fosforo estratto con il metodo Olsen (espresso come P_2O_5) può considerarsi un intervallo di concentrazione ottimale che garantisce buona disponibilità e risposta alla fertilizzazione fosfatica da parte delle colture senza produrre effetti legati ad un'eccessiva presenza. In particolare, all'interno del range ottimale, colture ad alta esigenza di fosforo (come ad es. il mais) necessitano di valori più elevati (20-30 mg/kg) mentre colture meno esigenti (ad es. cereali autunno-vernini) valori più bassi (12-20 mg/kg).

Nella **Tabella 12** sono riportati i dati di sintesi descrittiva relativi al contenuto medio ($\pm$ deviazione standard) di fosforo (P_2O_5) nei suoli, ripartiti per *Focus Area* (FA) in funzione delle diverse profondità di campionamento in post-raccolta nel 2025.

Tabella 12. Concentrazione media ($\pm$ SQM) di P_2O_5 (mg/kg) residuale per FA a diverse profondità in post-raccolta 2025

Focus Area	Media e deviazione standard di P_2O_5 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Alta pianura est	192,67 $\pm$ 115,64	114,87 $\pm$ 99,18	56,65 $\pm$ 37,08
Alta pianura ovest	70,72 $\pm$ 67,51	41,09 $\pm$ 27,84	31,46 $\pm$ 18,61
Media pianura	153,76 $\pm$ 71,17	83,88 $\pm$ 52	27,38 $\pm$ 14,01
Bassa pianura est	87,68 $\pm$ 77,52	51,79 $\pm$ 47,28	27,06 $\pm$ 19,93
Bassa pianura centrale	125,2 $\pm$ 80,44	68,08 $\pm$ 45,15	29,01 $\pm$ 17,13
Bassa pianura ovest	71,38 $\pm$ 78,4	54,55 $\pm$ 59,46	32,38 $\pm$ 37,34
Pianura totale	115,83 $\pm$ 93,24	69,2 $\pm$ 63,47	32,01 $\pm$ 26,43

In un contesto generale caratterizzato da elevata variabilità, tutte le FA sono caratterizzate da suoli molti ricchi in P_2O_5 assimilabile, soprattutto nell'orizzonte di suolo più superficiale. L'Alta Pianura_Est, la Media Pianura e la Bassa Pianura Centrale presentano le situazioni più critiche.

Il contenuto di P_2O_5 del suolo in post-raccolta può fornire utili informazioni sul possibile squilibrio della concimazione apportata alla coltura rispetto alle effettive esigenze ed è, quindi, un elemento utile per bilanciare le fertilizzazioni nell'anno successivo. Nella **Tabella 13** vengono riportati i valori di riferimento.

Tabella 13. Concentrazione di P_2O_5 assimilabile (metodo Olsen) nel terreno e relativa interpretazione agronomica (da Sbaraglia e Lucci, 1994)

Valori espressi in P_2O_5 [mg/kg]	GIUDIZIO
< 14	MOLTO BASSO
14-28	BASSO
28-45	MEDIO
45-70	ALTO
>70	MOLTO ALTO

In base a questa interpretazione agronomica, solo l'8,9% dei campioni superficiali (0-30 cm) presenta dei valori "bassi" o "molto bassi"; il 15,6% dei campioni ha dei valori di fosforo disponibile "medi", e il restante 75,6% ha dei valori tra "alti" e "molto alti" dei quali circa l'80% con valori molto alti" (> 70 mg/kg), per lo più concentrati nella porzione centrale della Regione (**Figura 6**).

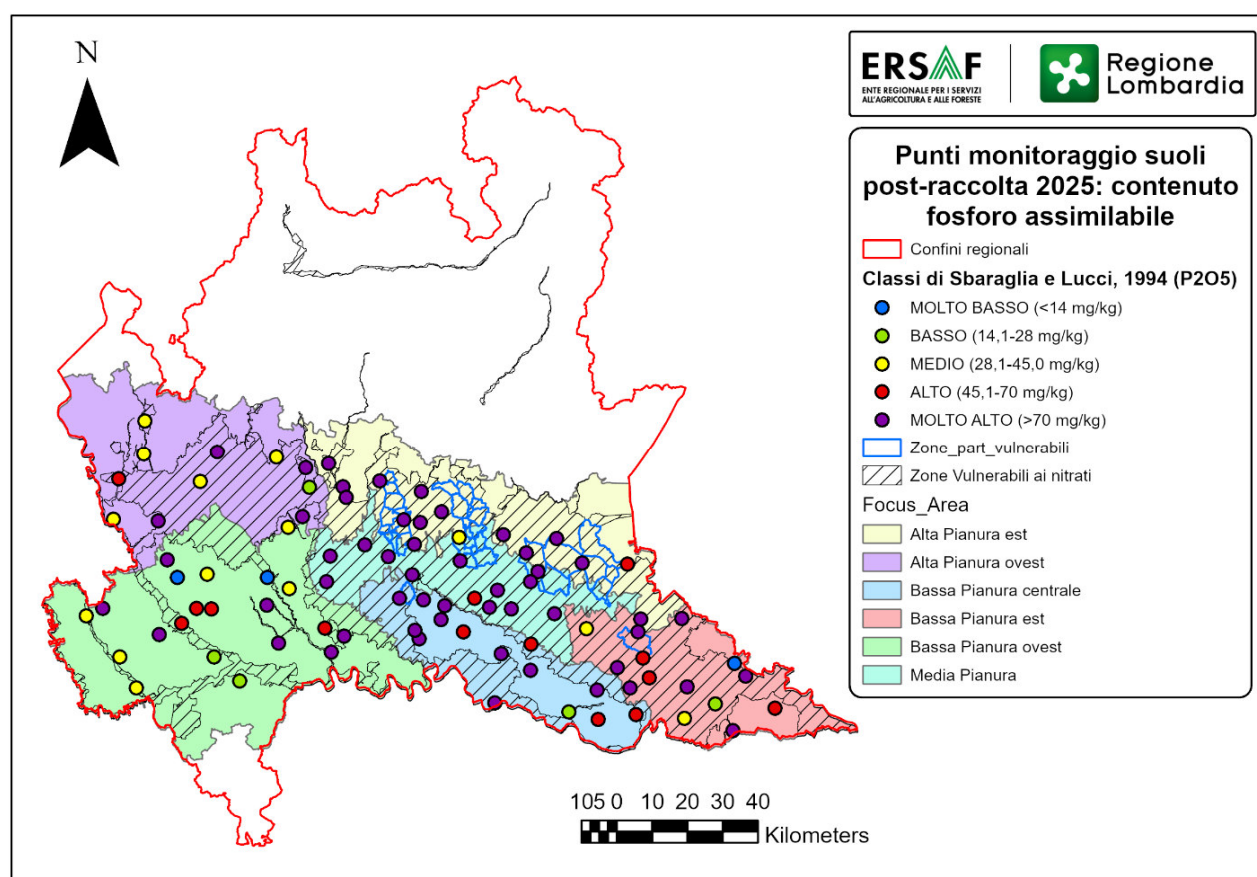


Figura 6. Contenuto di P_2O_5 nell'orizzonte superficiale (0-30 cm) nelle diverse FA, classificati come da Tabella 13.

2.3.2.1 Analisi statistica fosforo assimilabile

L'analisi statistica è stata condotta con la stessa metodica già descritta per i dati relativi all'azoto e sempre considerando le aziende di cui alla Tabella 4.

a) Fosfato e profondità

Nel **Grafico 8**, si riportano i box plot di tutto il profilo (0-90 cm) divisi per strati di profondità con le rispettive lettere (a-b-c) che evidenziano le differenze significative tra le FA:

- nello strato superficiale (0-30 cm) l'Alta Pianura Est, la Media Pianura e la Bassa Pianura Centrale hanno un contenuto simile di fosfato mentre la Bassa Pianura Ovest e l'Alta Pianura Ovest hanno un contenuto più basso rispetto all'Alta Pianura Est e alla Media Pianura;
- nel secondo strato (30-60 cm) la situazione tende a diventare omogenea con l'unica differenza significativa che si registra tra l'Alta Pianura Est e l'Alta Pianura Ovest;
- nello strato più profondo (60-90 cm) non si osservano più differenze significative tra le FA.

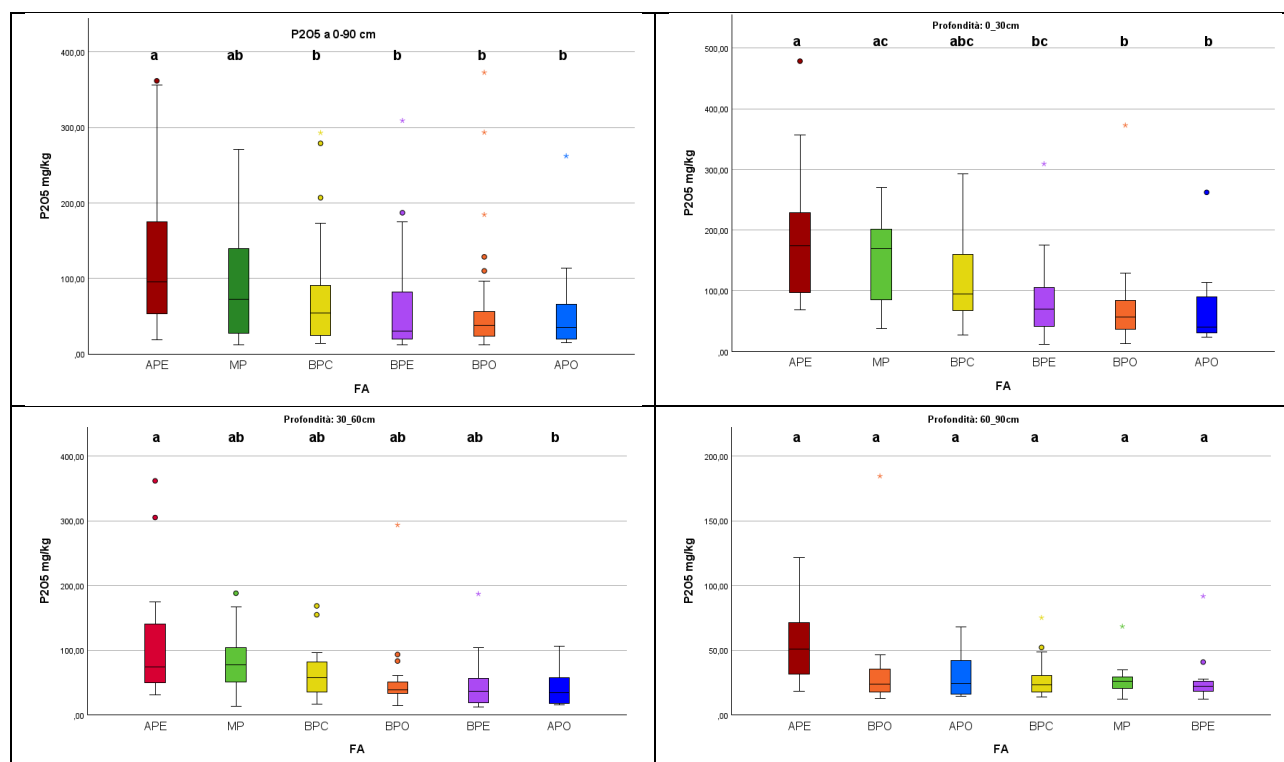


Grafico 8: Analisi del contenuto di fosforo assimilabile alle diverse profondità.

b) Fosfato e matrice

Nella **Tabella 14** si possono osservare la media e la deviazione standard di fosforo relative alle diverse matrici distribuite per profondità di campionamento che sono, poi, state utilizzate per la successiva analisi statistica.

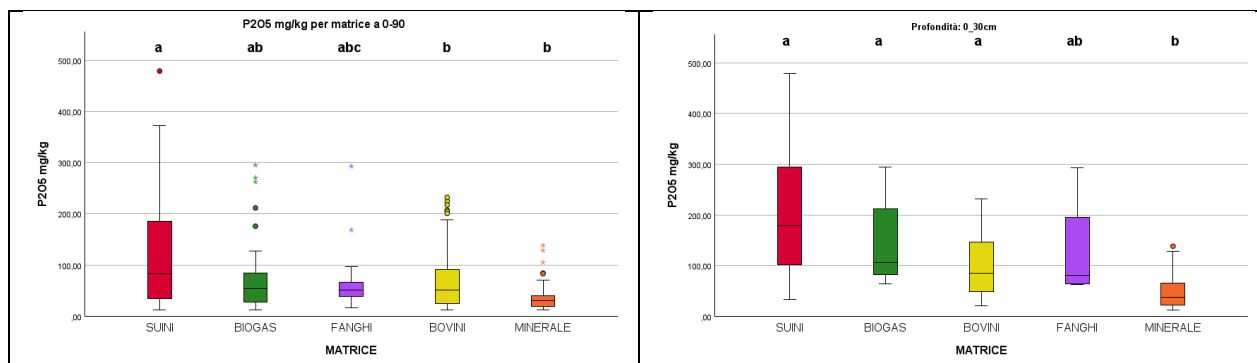
Tabella 14: Concentrazione media ($\pm$ SQM) di P_2O_5 (mg/kg) residuale per matrice a diverse profondità in post-raccolta 2025

Matrice	Media e deviazione standard di P_2O_5 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
BIOGAS	143,37 $\pm$ 83,39	54,63 $\pm$ 28,55	25,83 $\pm$ 11,65
BOVINI	101,53 $\pm$ 64,55	65,14 $\pm$ 45,17	31,32 $\pm$ 24,86
FANGHI	104,68 $\pm$ 110,23	63,8 $\pm$ 59,72	29,58 $\pm$ 18,82
MINERALE	50,41 $\pm$ 40,04	34,95 $\pm$ 19,03	26,28 $\pm$ 10,94
SUINI	198,66 $\pm$ 129,97	129,64 $\pm$ 106,53	47,48 $\pm$ 46,42

Osservando il **Grafico 9**, si può notare come il contenuto di fosforo nei terreni oggetto di campionamento in funzione della matrice distribuita mostra differenze significative a livello complessivo ($p < 0,001$): i terreni in cui sono stati utilizzati reflui zootecnici suinicoli presentano un contenuto di P_2O_5 superiore rispetto ai terreni concimati con reflui bovini e con concimi di origine minerale. Questo è riconducibile al rapporto N/ P_2O_5 molto basso caratteristico dei reflui suini.

Passando all'analisi dei singoli strati:

- a 0-30 cm vi è una distinzione netta tra suini, biogas e bovini rispetto ai concimi minerali mentre i fanghi non differiscono significativamente da nessuna tipologia di matrice;
- a 30-60 cm l'unica differenza che si registra è tra la matrice suinicola e quella minerale;
- nello strato più profondo non si registrano differenze.



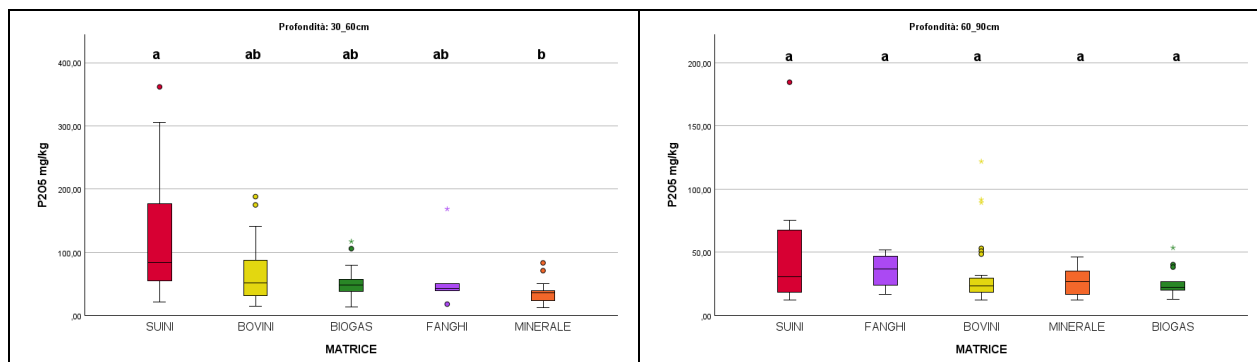


Grafico 9: Variabilità del fosforo assimilabile in funzione della matrice distribuita alle diverse profondità.

c) Fosfato e coltura

In **Tabella 15**, si possono osservare le medie di P_2O_5 residuale per profondità in funzione della coltura ritrovata durante le operazioni di campionamento.

Tabella 15: Concentrazione media ($\pm$ SQM) di P_2O_5 (mg/kg) residuale per coltura a diverse profondità in post-raccolta 2025.

Colture	Focus Area	Media di P_2O_5 espresso in mg/kg per profondità di campionamento		
		0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm
Altre colture	Alta pianura ovest	119,53 $\pm$ 124,72	55,8 $\pm$ 44,89	36,73 $\pm$ 20,03
	Bassa pianura est	195,75 $\pm$ 160,16	121,55 $\pm$ 92,56	33,5 $\pm$ 10,32
Mais-sorgo	Alta pianura est	199,64 $\pm$ 116,69	119,46 $\pm$ 101,26	56,65 $\pm$ 37,08
	Alta pianura ovest	63,18 $\pm$ 40,14	37,55 $\pm$ 26,75	27,1 $\pm$ 22,75
	Media pianura	153,76 $\pm$ 71,17	83,88 $\pm$ 52	27,38 $\pm$ 14,01
	Bassa pianura est	119,36 $\pm$ 80,12	67,82 $\pm$ 46,85	29,42 $\pm$ 17,70
	Bassa pianura centrale	58 $\pm$ 34,06	30,01 $\pm$ 14,91	27,83 $\pm$ 28,43
	Bassa pianura ovest	68,34 $\pm$ 37,99	49,12 $\pm$ 20,5	24,08 $\pm$ 10,39
Riso	Bassa pianura ovest	80,74 $\pm$ 102,63	59,59 $\pm$ 78,58	39,82 $\pm$ 49,12
Cereale autunno vernino	Alta pianura est	95,13	50,63	-
	Alta pianura ovest	30,5	119,46	-
	Bassa pianura est	102,32 $\pm$ 3,2	66,38 $\pm$ 23,91	26,94 $\pm$ 1,27
	Bassa pianura ovest	39,3 $\pm$ 32,95	32,95 $\pm$ 27,7	26,94 $\pm$ 1,28
Foraggera	Alta pianura est	40,2 $\pm$ 0,14	35 $\pm$ 0,99	34,45 $\pm$ 6,86
	Alta pianura ovest	75,13 $\pm$ 86,82	46,37 $\pm$ 50,11	21,07 $\pm$ 2,48

	Bassa pianura centrale	206,90	71,70	23,30
	Bassa pianura ovest	59,55 ± 35,43	67,25 ± 36,84	22,3 ± 1,98

Relativamente al contenuto di fosforo per le diverse colture, non si osservano differenze significative né considerando tutto lo strato campionato ($p = 0,163$), né alle diverse profondità (0-30 cm, $p = 0,307$; 30-60 cm $p = 0,458$; 60-90 cm $p = 0,690$).

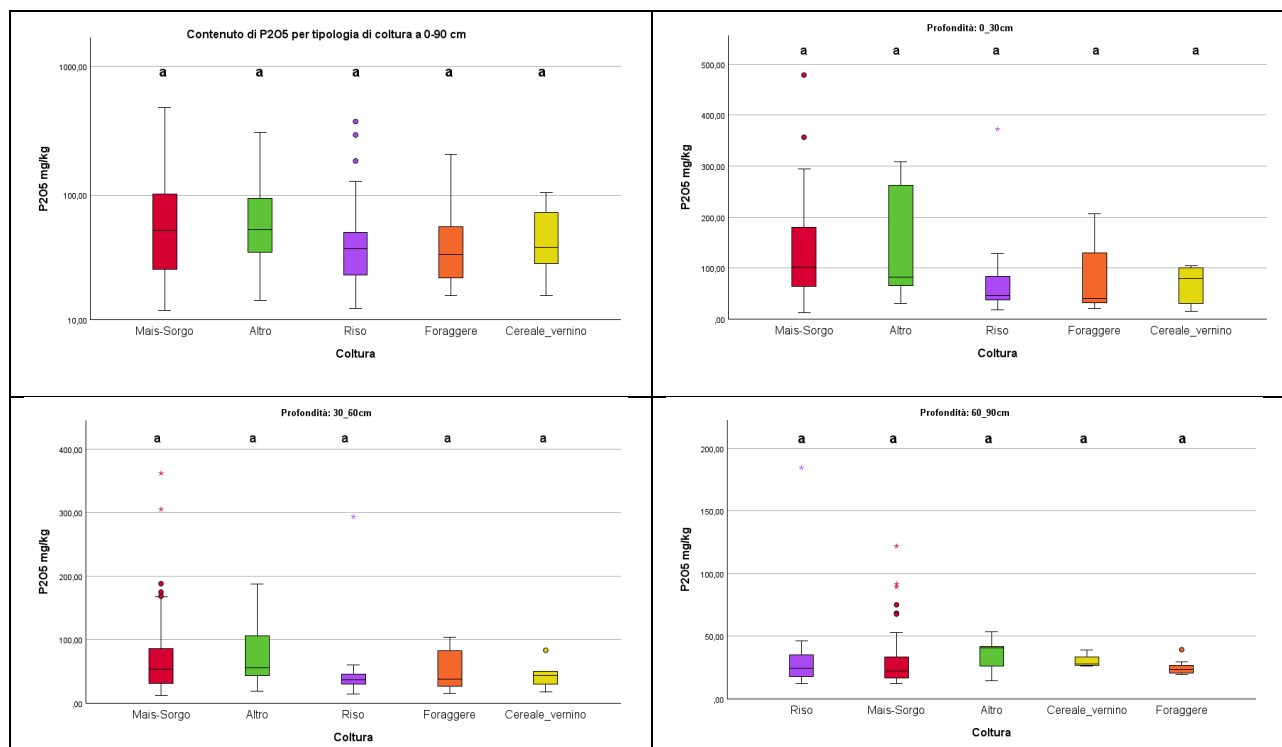
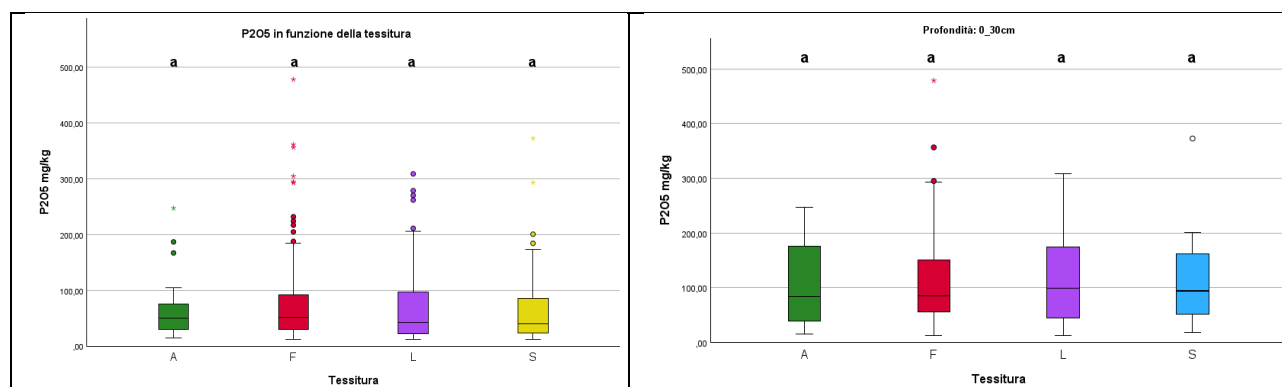


Grafico 10: Analisi del contenuto di fosforo assimilabile rispetto alla tipologia di coltura presente al momento del campionamento in post-raccolta 2025.

d) Fosfato e tessitura

Dal confronto del contenuto di P₂O₅ in funzione della tessitura dei terreni monitorati non sono state rilevate differenze significative sia a livello complessivo (0-90 cm) sia nei i differenti strati.



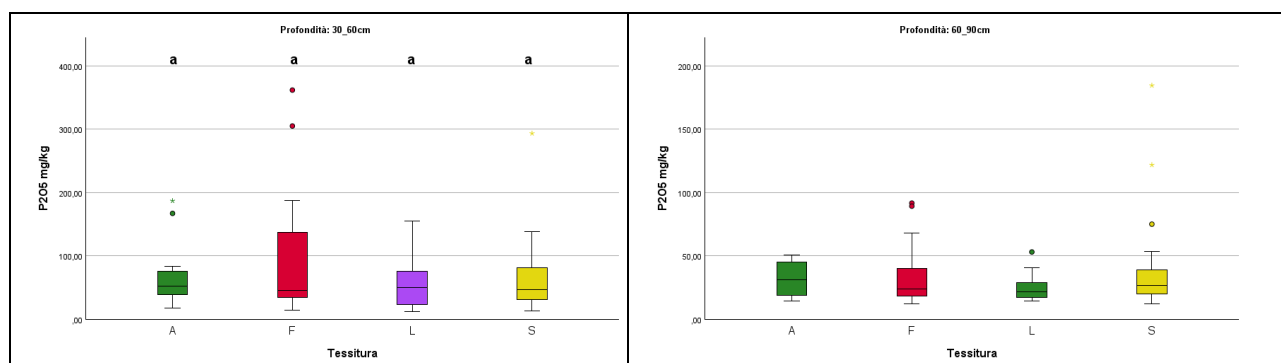


Grafico 11: Analisi del contenuto di fosforo assimilabile in funzione della tessitura.

e) Fosfato e fertilizzazione

Nel **Grafico 12**, è stato messo in relazione il contenuto di anidride fosforica nel terreno con il carico medio di ogni FA (ottenuto dalla media dei carichi di anidride fosforica delle aziende selezionate).

L'Alta Pianura Est, che ha il contenuto medio di P_2O_5 maggiore nel suolo (135 mg/kg), è anche la FA che ha il carico medio zootecnico aziendale di fosforo maggiore (153 kg/ha) mentre le FA ad ovest, che hanno il contenuto di fosforo assimilabile nel suolo inferiore (APO = 48 mg/kg, BPO = 54 mg/kg) minore, hanno anche i carichi medi aziendali minori (rispettivamente 51 e 26 kg/ha di P_2O_5).

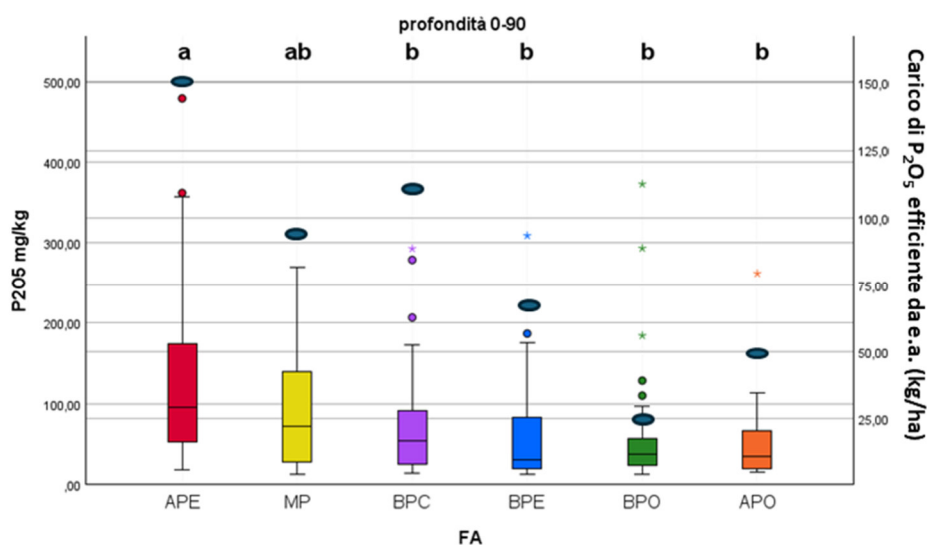


Grafico 12: Fosforo residuale nello strato 0-90 cm e carico di fosforo efficiente da e.a. della FA delle aziende oggetto del campionamento rappresentato dagli ovali blu (valori riportati in **Tabella 6**).

Nel **Grafico 13** è stato enfatizzato quanto riportato sopra e, infatti, le differenze tra le Focus Area risultano ancora più accentuate rispetto alla situazione 0-90 cm.

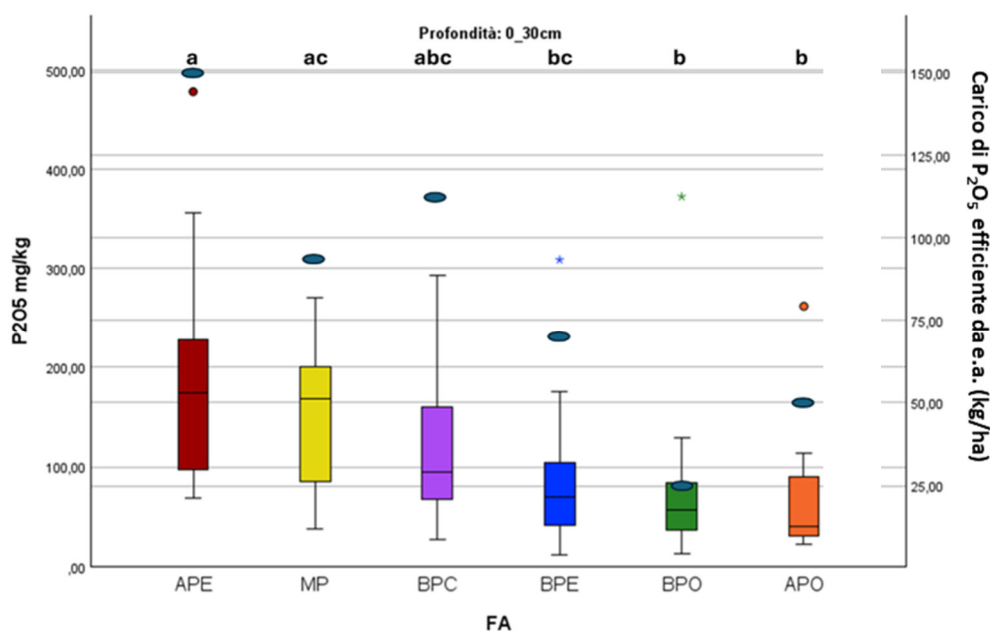


Grafico 13: Fosforo residuale nello strato superficiale e carico di fosforo medio della FA delle aziende oggetto del campionamento rappresentato dagli ovali blu (valori riportati in **Tabella 6**).

Per valutare la possibile relazione tra carico medio aziendale e contenuto di fosforo assimilabile nel terreno gestito dall'azienda, si è eseguita un'analisi di correlazione tra le due variabili. A livello complessivo (0-90 cm) si osserva una correlazione positiva ($\rho = 0,331$, $p < 0,001$) moderata tra i carichi di fosforo e il contenuto nel terreno. Entrando nel dettaglio degli strati di suolo, invece, si può osservare che:

- nello strato 0-30 cm la correlazione è positiva e forte ($\rho = 0,536$; $p < 0,001$);
- nello strato 30-60 cm la correlazione diminuisce ma comunque rimane positiva e significativa ($\rho = 0,430$; $p < 0,001$);
- nello strato 60-90 cm non si osserva correlazione significativa ($\rho = 0,383$; $p < 0,100$).

2.3.2.2 Fosforo – considerazioni finali

Dai risultati della campagna di monitoraggio relativamente al fosforo assimilabile si è osservato che:

- il fosforo tende ad accumularsi negli strati superficiali, infatti difficilmente questo nutriente liscivia;
- la concimazione con matrici organiche ed in particolar modo con l'effluente suino contribuisce in maniera sostanziale all'incremento del contenuto di fosforo assimilabile nel suolo;
- le concentrazioni maggiori di fosforo nel suolo si registrano nell'area centro orientale della Regione.

Si può, pertanto, evincere che:

- gli apporti di fosforo in generale hanno un effetto ben visibile sul primo strato di terreno mentre in profondità, le variazioni tendono ad essere meno marcate;
- alle profondità maggiori di suolo il contenuto di fosforo non è più influenzato dalle scelte gestionali correnti dell'agricoltore, ma è determinato prevalentemente dalle caratteristiche geochimiche naturali del sito o da dinamiche di accumulo di lunghissimo periodo.

Per capire quali siano i fattori che maggiormente influenzano il contenuto di P_2O_5 nel suolo è stata eseguita una regressione lineare. Di seguito si riportano i risultati nel **Grafico 14**.

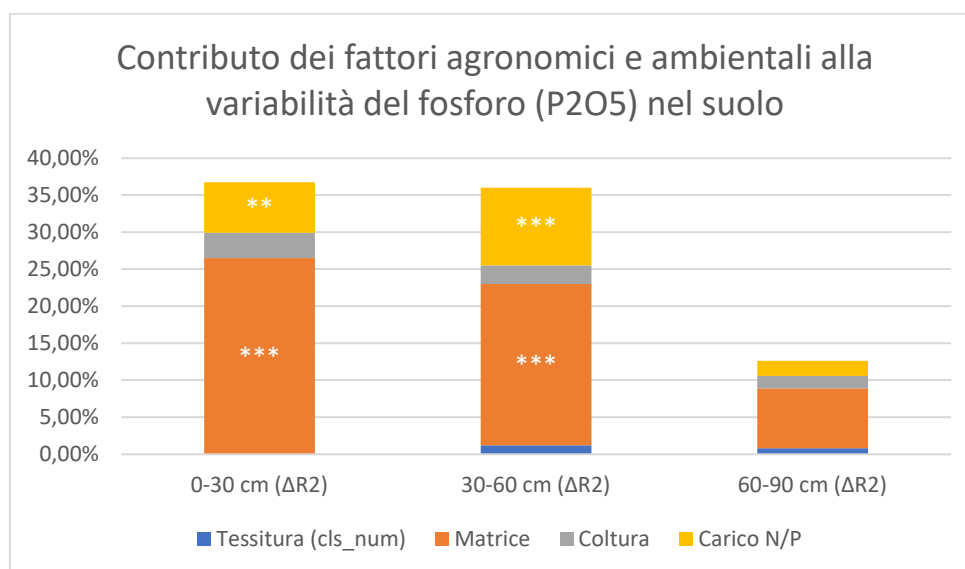


Grafico 14: Variabili che influenzano il contenuto di fosforo assimilabile alle diverse profondità. Gli asterischi indicano la significatività della modifica del modello: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$. I blocchi senza asterischi non apportano un contributo statistica

L'analisi di regressione lineare conferma che la variabilità del fosforo nel suolo è dettata prevalentemente da fattori antropici. La Tessitura e la Coltura mostrano contributi marginali e spesso non significativi lungo tutto il profilo.

Strato 0-30 cm: il modello spiega il 36,6% della varianza totale, con il contributo dominante della Matrice ($\Delta R^2 = 26,5\%$) e del Carico ($\Delta R^2 = 6,8\%$). In particolare, l'uso di matrici organiche suinicole risulta il principale predittore dell'accumulo di P_2O_5 ($p < 0,001$).

Strato 30-60 cm: il Carico aziendale incrementa il suo peso relativo ($\Delta R^2 = 10,5\%$), confermando la migrazione verticale dell'elemento legata alla pressione della fertilizzazione.

Strato 60-90 cm: la perdita di significatività del modello ($p = 0,480$) dimostra che l'influenza della gestione agronomica si esaurisce entro i primi 60 cm, lasciando spazio a variabili ambientali e pedologiche non catturate dai parametri aziendali correnti.

2.3.3 Conclusioni monitoraggio suolo

In conclusione, il confronto tra i due nutrienti evidenzia dinamiche opposte: mentre la distribuzione dell'azoto nitrico è influenzata dalla tessitura e dalla lisciviazione lungo tutto il profilo, il fosforo appare come un elemento "accumulativo" e poco mobile, la cui presenza è dettata quasi esclusivamente dalla fertilizzazione (carico e matrici organiche) nei primi 60 cm di suolo.

3 Rete per il monitoraggio della falda acquifera ipodermica

Come riportato nel PdM, in ciascuna delle 6 Focus Area sono stati individuati 3-4 punti caratterizzati dalla presenza di falda acquifera ipodermica dove, a una profondità compresa tra 0 e 3 m, sono stati installati 18 piezometri per il campionamento delle acque (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.). Queste falde molto superficiali sono fortemente influenzate dalle precipitazioni e dagli interventi irrigui oltre che dalla presenza di eventuali corsi d'acqua e fontanili nelle immediate vicinanze. I valori di concentrazione di nitrati misurati non devono quindi essere confrontati con quelli rilevati nei pozzi della rete di monitoraggio regionale della prima falda (Idrostruttura Sotterranea Superficiale – ISS). Le concentrazioni misurate, seppur risentendo in prima battuta delle gestioni agricole (obiettivo di questo monitoraggio), possono subire variazioni legate anche alla presenza di corpi idrici che alimentano a intermittenza l'idromorfia dei suoli e il grado di saturazione dell'immediato sottosuolo.

Nel corso del 2025 sono stati spostati alcuni piezometri (**Tabella 11**), ove le concentrazioni di nitrati e fosfati si sono mantenute costantemente molto basse (< 10 mg/l) per anni, dimostrando che il piezometro attingeva di fatto da una falda in comunicazione e alimentata da acque superficiali quali laghi o corsi d'acqua nelle immediate vicinanze. Ai fini quindi del monitoraggio delle acque subsuperficiali, che in questo studio è diretto ad indagare le gestioni agronomiche immediatamente sovrastanti, non erano di qualche utilità a causa dell'elevato fattore di diluizione.

Tabella 11. Elenco dei piezometri disinstallati e installati in altre zone più significative per gli obiettivi del presente monitoraggio

Comune	Piezometro	Comune	Piezometro
disinstallato		nuova installazione	
Castellucchio		Curtatone	
Canneto sull'Oglio		Leno	
Basiglio		Zibido San Giacomo	
Pessina Cremonese		Soresina	
Anzano del Parco		Travedona Monate	

In ciascuno dei nuovi piezometri vengono eseguite come di consueto 4 campagne di campionamento all'anno indicativamente nei mesi di: febbraio, maggio, agosto, e novembre.

Per i piezometri di nuova installazione è stato raccolto un numero di campioni inferiore a 4 in quanto la messa in opera è avvenuta nel corso della stagione 2025.

Ai fini di una più approfondita conoscenza di questi ambiti di monitoraggio, in prossimità dei piezometri in cui sono stati rilevati elevati valori di nitrato nell'acqua prelevata nel corso della campagna di monitoraggio 2025 (valori frequentemente oltre 40mg/l), sono stati eseguiti dei campionamenti di suolo (nel campo in cui è localizzato il piezometro o in quello immediatamente a monte) per valutare una possibile correlazione tra le concentrazioni di nitrati rilevate e la gestione del terreno. Dato che questa attività di campionamento dei suoli è iniziata a metà anno, si rimanda al Report di Monitoraggio 2026 per l'elaborazione dei dati.

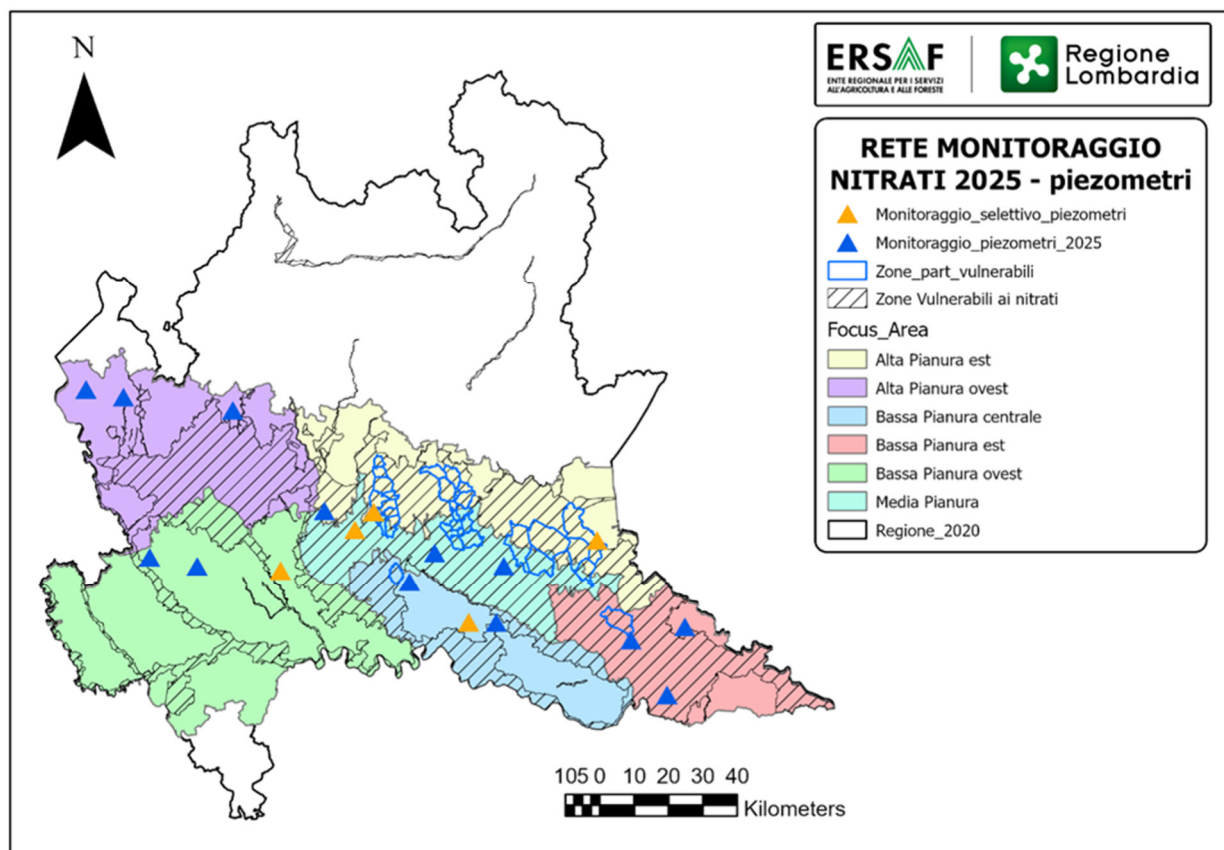


Figura 7 Localizzazione dei 18 punti per il monitoraggio della falda acquifera ipodermica e individuazione dei piezometri oggetto del monitoraggio anche del suolo.

3.1 Metodica di campionamento

Ogni piezometro è costituito da un tubo forato nella parte basale che raccoglie l'acqua della falda ipodermica e che, durante il campionamento, viene svuotato tramite l'utilizzo di un'apposita pompa; dopo qualche minuto, l'acqua invade nuovamente il condotto e quest'acqua viene campionata e inviata al laboratorio per le analisi chimiche.

3.2 Parametri analizzati

Le determinazioni analitiche sui campioni di acqua hanno riguardato il contenuto di nitrati e fosfati disciolti nella falda ipodermica; le analisi sono state eseguite in accordo con metodi ufficiali (**Tabella 16**) presso un laboratorio di analisi esterno accreditato.

Tabella 16. Elenco delle determinazioni analitiche e dei relativi metodi utilizzati

PARAMETRO	METODO
Concentrazione nitrati (NO_3^-) mg/L	UNI EN ISO 10304-1:2009
Concentrazione fosfati (PO_4^-) mg/L	UNI EN ISO 10304-1:2009

A partire dalla fine del 2023 è iniziata l'installazione di un sistema di misura in continuo dei livelli piezometrici, tramite data logger, su ciascuno dei 18 piezometri. Per alcuni piezometri è quindi disponibile l'andamento del livello di falda per l'intera annualità mentre per quelli di nuova installazione sono per ora disponibili solo alcuni mesi. La lettura dell'andamento piezometrico è rilevante per interpretare le variazioni delle concentrazioni di nitrati poiché

indica in questo contesto e in prima approssimazione, il volume d'acqua in cui i soluti si diluiscono. Infatti, il livello di falda costante durante tutto l'anno denota che il corpo acquifero intercettato dal piezometro è con ogni probabilità una falda acquifera con elevata trasmissibilità. Viceversa, una significativa variabilità nei livelli piezometrici durante l'anno in funzione, ad esempio, delle precipitazioni indica che il piezometro ha intercettato una falda idromorfa caratterizzata da scarsa trasmissibilità e di conseguenza contenente un volume d'acqua limitato. Queste caratteristiche del corpo idrico determinano una maggiore variabilità delle concentrazioni dei nitrati disciolti che risultano quindi fortemente influenzate dall'andamento stagionale (precipitazioni) e dalle gestioni agricole (interventi irrigui e fertilizzazioni).

3.3 RISULTATI 2025

Nel presente paragrafo vengono riportati i risultati ottenuti dall'attività di monitoraggio della falda ipodermica nel 2025. I campionamenti sono stati eseguiti prevalentemente presso aree coltivate a seminativi e prati permanenti, nell'ambito di aziende zootecniche (67%) e non zootecniche (33%).

3.3.1 Nitrati disciolti

Nella **Tabella 17** sono riportate le classi di valutazione della qualità delle acque sotterranee, così come definite dalla Commissione Europea. Tali classi sono state utilizzate per un confronto indicativo dei risultati ottenuti dai campionamenti effettuati nell'ambito delle diverse campagne di monitoraggio.

Tabella 17. Classi di qualità delle acque sotterranee individuate dalla Commissione Europea

Concentrazione NO ₃ ⁻ (mg/l)	Qualità delle acque sotterranee
0-24,99	Acque di buona qualità, che possono essere monitorate con periodicità più lunga
25-39,99	Acque con concentrazione di nitrati oltre la soglia di significatività
40-49,99	Acque a rischio di superamento dei valori limite (soglia di attenzione)
≥50	Acque oltre il limite (inquinamento)

Nella **Tabella 18** sono elencati i 18 siti oggetto di monitoraggio nel 2025, suddivisi per FA, con la relativa concentrazione media di NO_3^- riscontrata nella falda ipodermica, ottenuta considerando i risultati delle analisi derivanti dai 4 campionamenti annuali.

Tabella 18. Concentrazione media di ione nitrato (NO_3^-) nelle falde ipodermiche durante il 2025

Focus Area	Prov.	Comune	Concentrazione media NO_3^- (mg/l)
Alta Pianura Est	BG	Casirate d'Adda	3,3
	BS	Desenzano	51,5
	BG	Fara Olivana	26,8
Alta Pianura Ovest	CO	Anzano del Parco	8,1
	VA	Travedona Monate	0,1
	VA	Varese	7,2
Media Pianura	BG	Caravaggio	1,5
	BS	Leno	70,0
	BS	Orzinuovi	10,4
Bassa Pianura Est	MN	Carpaneta	14,9
	MN	Curtatone	64,0
	MN	Pegognaga	25,0
Bassa Pianura Centrale	CR	Persico Dosimo	100,8
	CR	Pescarolo	15,0
	CR	Soresina	16,0
Bassa Pianura Ovest	MI	Abbiategrosso	22,3
	LO	Tavazzano	2,0
	MI	Zibido San Giacomo	11,1

I risultati evidenziano che nella maggior parte dei siti analizzati la concentrazione di nitrati nelle acque stabilmente circolanti nel suolo (falda ipodermica) si attesti su valori ottimali, che si collocano nella classe delle acque considerate di buona qualità (< 25 mg/l).

Fanno eccezione, in particolare, le seguenti stazioni:

- Desenzano del Garda (APE)
- Leno (MP)
- Curtatone (BPE)
- Persico Dosimo (BPC)

Nei successivi paragrafi si analizzano nel dettaglio, per ciascuna FA, queste stazioni, mettendo in relazione le concentrazioni di nitrati misurate nelle diverse campagne di monitoraggio con le precipitazioni rilevate presso le stazioni meteo ARPA più vicine al relativo piezometro.

3.3.1.1 Stazione di Desenzano – BS (APE)

Nella stazione di Desenzano (**Figura 8**), situata in un campo gestito da un'azienda zootecnica di vacche da latte, nel corso del 2025 il valore medio delle concentrazioni rilevate si attesta sui evidenzia 51,5 mg/l. Questa concentrazione media elevata è determinata da 2 valori elevati superiori a 50 mg/l, concentrati in prevalenza nella prima metà dell'anno.

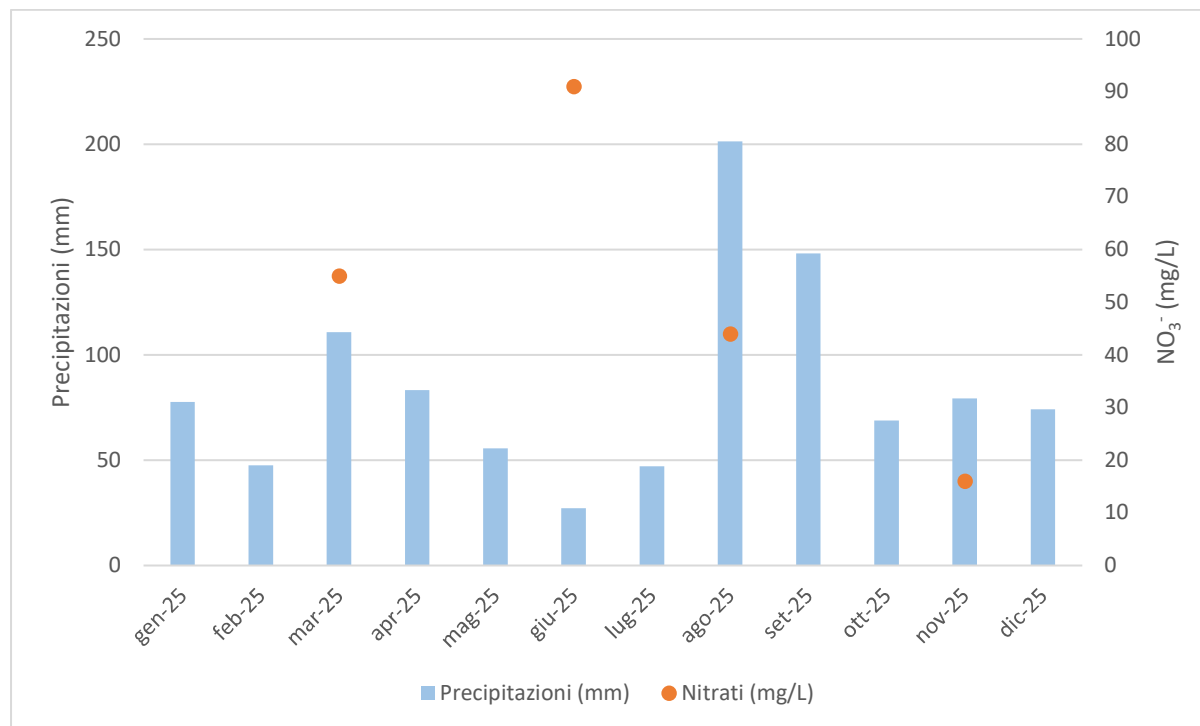


Figura 8. Concentrazione di nitrati (mg/l) (punti) nelle acque campionate nella stazione di Desenzano in rapporto alle precipitazioni (mm) rilevate presso la stazione meteo ARPA di Montichiari Boschetti (colonne azzurre).

L'andamento freatico (**Figura 9**) evidenzia la presenza di un corpo idrico con soggiacenza media di 1,10 m dal piano campagna caratterizzato da un'escursione massima di 0,98 m durante l'anno. Questo corpo idrico è reattivo alle precipitazioni intense come si evidenzia nel corso del mese di agosto e settembre, dove alcuni fenomeni precipitativi intensi verificatisi in questo periodo hanno determinato un aumento del livello della falda.

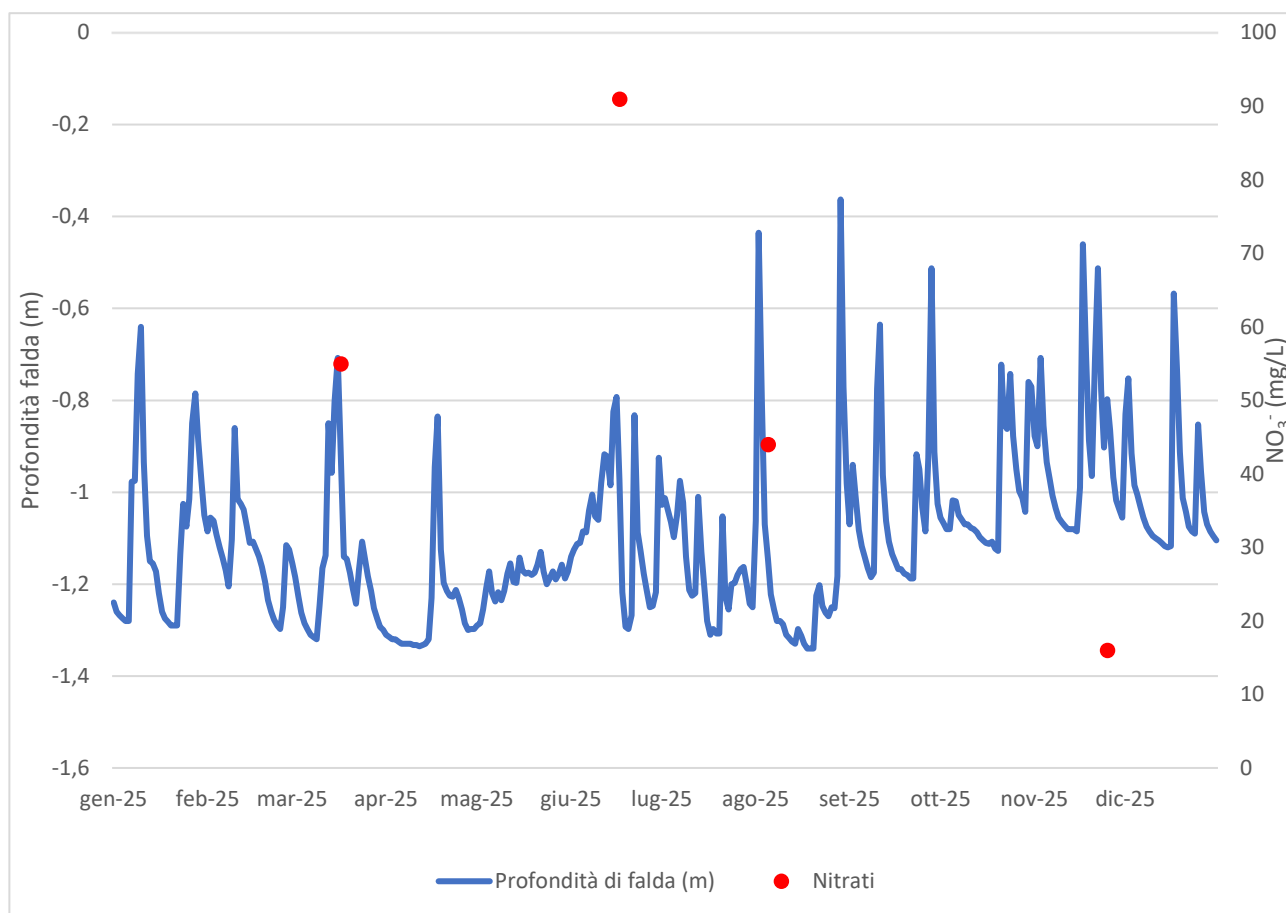


Figura 9. Andamento piezometrico rilevato nel piezometro di Desenzano in rapporto alla concentrazione (mg/l) di nitrati (punti rossi).

La concentrazione più elevata di nitrato (91 mg/l) è stata osservata nel mese di giugno, uno dei mesi meno piovosi dello scorso 2025. Nel mese del giugno 2025, a causa delle elevate temperature che si erano registrate da metà mese in poi, l'aumento della concentrazione di nitrato potrebbe essere stato indotto da un aumento delle irrigazioni, dinamica osservabile dai continui innalzamenti di falda tra giugno e luglio.

3.3.1.2 Stazione di Leno – BS (MP)

La stazione di Leno (**Figura 10**), situata nell'ambito di un terreno di un'azienda a seminativi, è stata installata nella seconda metà del 2025. Per questo motivo, sono stati eseguiti solo due campionamenti di acque, caratterizzati da valori piuttosto elevati > 50 mg/l.

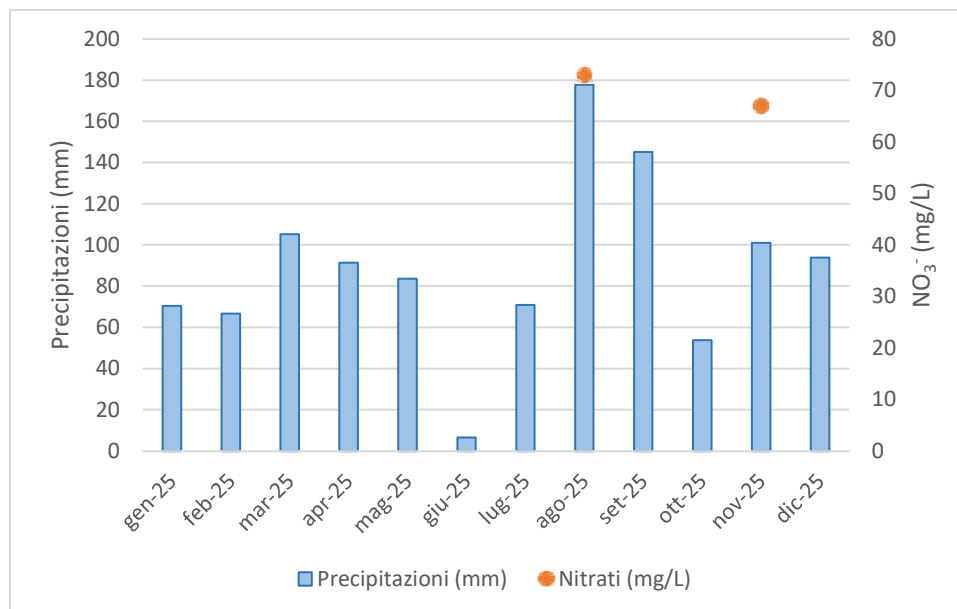


Figura 10. Concentrazione di nitrati (mg/l) (punti) nelle acque campionate nella stazione di Leno in rapporto alle precipitazioni (mm) rilevate presso la stazione meteo ARPA di Manerbio (colonne azzurre).

È bene sottolineare che il campionamento di agosto è stato effettuato dopo un paio di precipitazioni intense avvenute una settimana prima del prelievo che potrebbero aver favorito la lisciviazione del nitrato in falda, in un periodo in cui nell'area circostante, la coltura principale presente, il mais, veniva via via raccolto, venendo meno la sua attività di asportazione.

3.3.1.3 Stazione di Curtatone – MN (BPE)

Anche la stazione di Curtatone, così come quella di Leno, è stata installata nella seconda metà del 2025. È inserita in un'azienda dedicata alla coltivazione di ortaggi e nel corso del 2025 sono stati eseguiti solo due campionamenti.

Come si può osservare dalla **Figura 11**, i valori superano il limite di 50 mg/l per entrambi i campioni prelevati (58 e 70 mg/l).

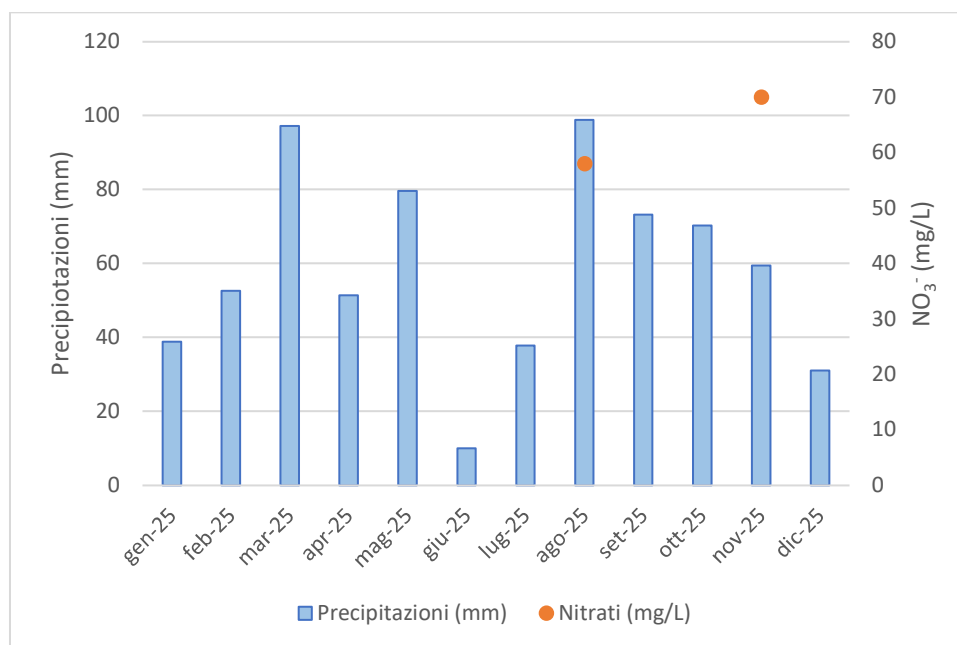


Figura 11. Contenuto di nitrati (mg/l) (punti) nelle acque campionate nella stazione di Curtatone in rapporto alle precipitazioni (mm) rilevate presso la stazione meteo ARPA di Mantova Lunetta 2 (colonne azzurre).

3.3.1.4 Stazione di Persico Dosimo – CR (BPC)

La stazione di Persico Dosimo (**Figura 12**), situata in un terreno gestito da un'azienda cerealicolo-zootecnica, nel corso del 2025 ha registrato valori sempre molto alti, ad eccezione del prelievo di agosto 2025. È bene sottolineare che proprio questo prelievo è stato effettuato prima delle abbondanti precipitazioni che hanno contraddistinto il mese di agosto.

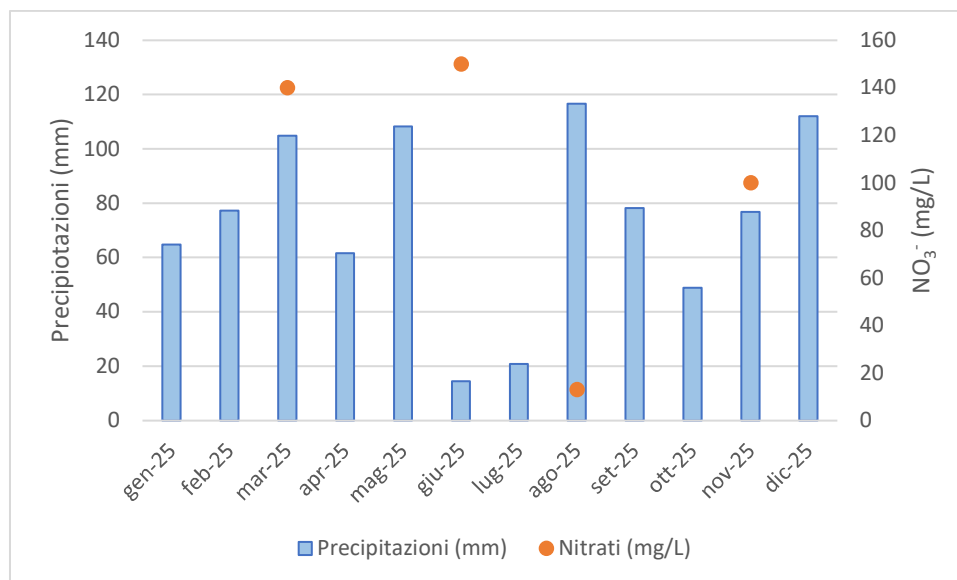


Figura 12. Contenuto di nitrati (mg/l) (punti) nelle acque campionate nella stazione di Persico Dosimo in rapporto alle precipitazioni (mm) rilevate presso la stazione meteo ARPA di Persico Dosimo (colonne azzurre).

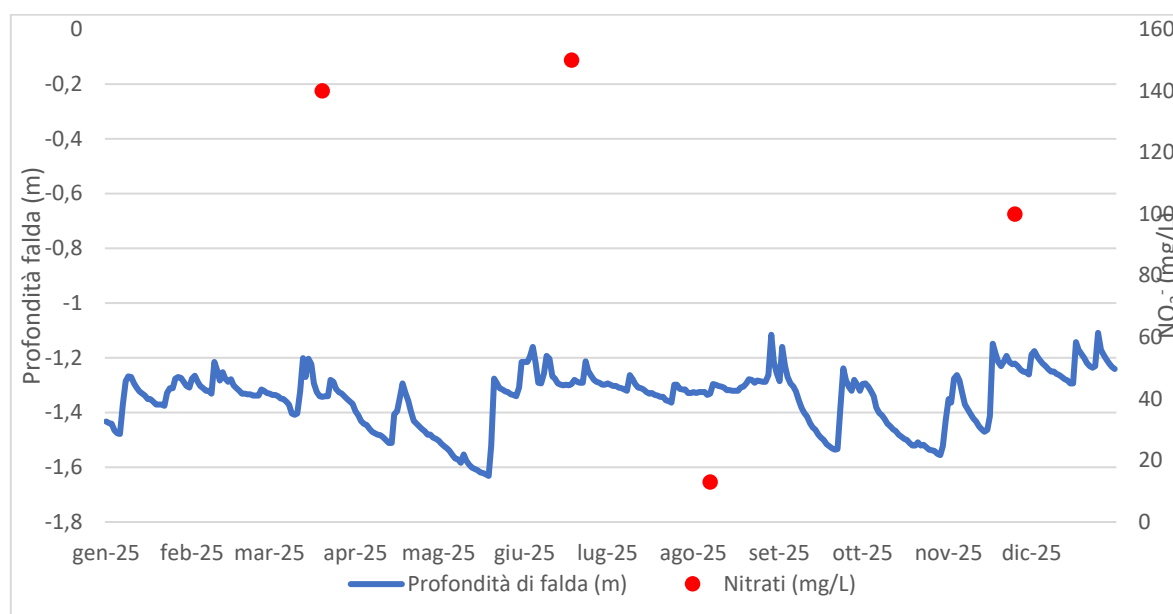


Figura 13: Andamento piezometrico rilevato nel piezometro di Persico Dosimo in rapporto alla concentrazione (mg/l) di nitrati (punti rossi).

La bassa concentrazione di nitrato registrata nel mese di agosto, anche per questa stazione, potrebbe essere dovuta all'elevata asportazione di azoto esercitata dal mais in piena fase vegetativa abbondantemente presente nell'area. I massimi di marzo, giugno e novembre (**Figura 13**) potrebbero essere spiegati dalle distribuzioni di liquami:

1. Per la preparazione del letto di semina per il mais di primo raccolto;
2. A seguito della fienagione e/o trinciatura cereali autunno-vernini;
3. Per la preparazione del letto di semina per i cereali autunno vernini.

3.3.2 Fosfati disciolti

Nel corso del 2025, solo 10 campioni hanno rilevato valori superiori al limite di rilevabilità.

La maggior parte di questi campioni sono stati raccolti in piezometri in cui, negli anni passati, si sono registrati alti valori anche di nitrato e sono associati ad aziende agricole zootecniche (Orzinuovi, Desenzano e Caravaggio).

Solo 3 campioni hanno registrato valori superiori all'unità, in particolare due nella stazione di Orzinuovi (1,25 mg/l e 2,57 mg/l) (**Figura 14**) e uno nella stazione di Desenzano (2,44 mg/l).

In **Figura 14**, si può osservare che in tutti i mesi in cui si sono registrati valori sopra il limite di rilevabilità, si sono avute abbondanti precipitazioni che potrebbero aver trasportato i fosfati verso la falda ipodermica.

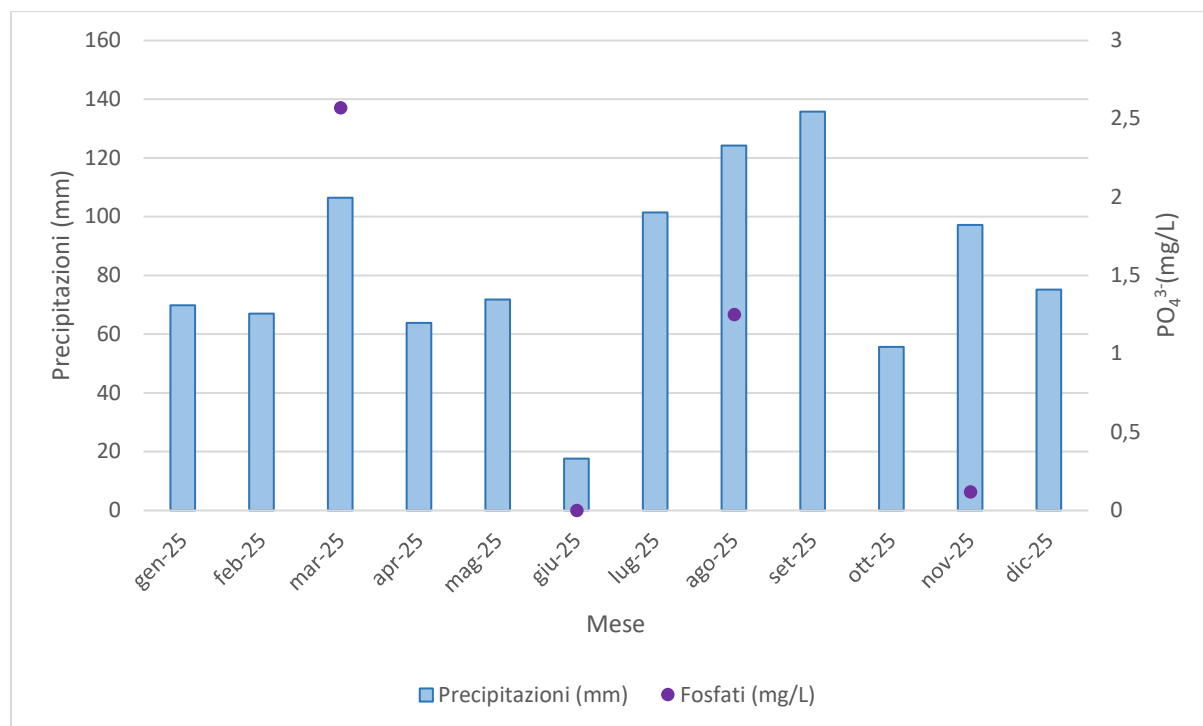


Figura 14. Contenuto di fosfati (mg/l) (punti) nelle acque campionate nella stazione di Orzinuovi in rapporto alle precipitazioni (mm) rilevate presso la stazione meteo ARPA di Soncino (colonne azzurre).

4 BIBLIOGRAFIA

D.lgs 16 marzo 2009, n. 30 - Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. Norme in materia ambientale.

Decreto Ministeriale del 13/09/1999. *Metodi ufficiali di analisi chimica del suolo*. Supplemento Ordinario n. 185 – G.U. n. 248 del 21 ottobre 1999 e ss.mm.ii.

ERSAF (2011). Carta dei Suoli della Lombardia.

ERSAF (2020-2022). Identificazione dei valori di fondo geochimico dei metalli nei suoli della pianura lombarda - analisi preliminare.

Metodo Olsen, rif. XV.3 Suppl. ordinario G.U. n. 248 del 21/10/99.

Sullivan D.M., Cogger C.G. (2003). *Post-harvest soil nitrate testing for manured cropping systems west of the Cascades*. Oregon State University Extension Service. EM.