Ab Intus Revista Ab Intus FAV-UNRC
2026, 18(9) ISSN 2618-2734

Aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de biogás: efectos nutricionales y ambientales en un sistema suelo-cultivo

Agricultural application of digestate from biogas plants: nutritional and environmental effects in the soil-crop system

DOI: https://doi.org/10.63207/ai.v9i18.201

Yanina Chilano*[1], María Silvana Amín[1], Marcos Darío Bongiovanni[1]

1. Departamento de Ecología Agraria, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto.

Resumen. El crecimiento de las plantas de biogás ha incrementado la producción de digerido, un subproducto de la digestión anaeróbica que requiere un uso final adecuado para evitar impactos ambientales. Diversos estudios sugieren que los efectos negativos de su acumulación pueden mitigarse mediante su aplicación como biofertilizante en sistemas agrícolas. Este estudio evaluó los efectos del digerido sobre el rendimiento del cultivo de maíz y las propiedades del suelo. Se estableció un experimento en campo con cinco tratamientos: fertilización mineral, tres dosis de digerido (90, 180 y 270 m^3 ha^{-1}) y un testigo sin fertilización. Se midieron variables de fitotoxicidad, rendimiento del cultivo y características fisicoquímicas, químicas y biológicas del suelo. Los resultados indicaron que la aplicación de digerido mejoró el rendimiento sin generar efectos fitotóxicos. En el suelo, se observó un aumento de la respiración microbiana, del contenido de nitratos y fósforo superficial, y de la saturación de magnesio y potasio. No se detectaron variaciones del pH ni del contenido de materia orgánica. Sin embargo, dosis elevadas incrementaron la conductividad eléctrica, el sodio intercambiable, la acumulación de fósforo en profundidad y el riesgo de lixiviación de nitratos. Se concluye que el digerido es un biofertilizante eficaz, aunque su uso debe ser monitoreado para evitar efectos negativos como salinización, sodificación y pérdida de nutrientes, promoviendo una fertilización sostenible.

Palabras clave: biofertilizante, bioinsumo, rendimiento, macronutriente, sustentabilidad agrícola.

Abstract. The growth of biogas plants has increased the production of digestate, a byproduct of anaerobic digestion that requires proper end use to avoid environmental impacts. Various studies suggest that the negative effects of its accumulation can be mitigated through its application as a biofertilizer in agricultural systems. This study evaluated the effects of digestate on maize crop yield and soil properties. A field experiment was established with five treatments: mineral fertilization, three digestate doses (90, 180, and 270 m^3 ha^{-1}), and an unfertilized control. Variables related to phytotoxicity, crop yield, and soil physicochemical, chemical, and biological characteristics were measured. The results indicated that digestate application improved yield without causing phytotoxic effects. In the soil, an increase in microbial respiration, nitrate and surface phosphorus con-

Recibido: 24/9/2025
Aceptado: 1/3/2026
Publicado: 28/10/2026

*Autora para correspondencia: Yanina Chilano, ychilano@ayv.unrc.edu.ar, Ruta 36 - Km 601 X5804BYA Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Financiamiento: UNRC

Esta obra está bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_AR

tent, and magnesium and potassium saturation was observed. No changes in pH or organic matter content were detected. However, high doses increased electrical conductivity, exchangeable sodium, phosphorus accumulation at depth, and the risk of nitrate leaching. It is concluded that digestate is an effective biofertilizer, although its use should be monitored to avoid negative effects such as salinization, sodification, and nutrient loss, promoting sustainable fertilization.

Keywords: yield, biofertilizer, agricultural sustainability.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de energía, junto con la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad energética, ha impulsado la transición hacia fuentes renovables (Muscolo *et al.,* 2017, Pastorelli *et al.,* 2021). Entre estas energías, el biogás ha adquirido relevancia a nivel regional, nacional e internacional debido a su versatilidad (Holm-Nielsen *et al.,* 2009). Su producción se basa en la digestión anaeróbica, un proceso eficiente que degrada material orgánico en ausencia de oxígeno, generando una mezcla compuesta principalmente por metano, dióxido de carbono y otros compuestos (Van Midden *et al.,* 2023).

Durante este proceso, se genera el digerido, un subproducto de mayor estabilidad microbiana e higiene que los residuos no digeridos, rico en macro (N, P, K, Ca, S y Mg) y micronutrientes (B, Cl, Mn, Fe, Zn, Cu, Mo y Ni), esenciales para las plantas (Muscolo *et al.,* 2017). Sin embargo la producción de biogás conlleva la generación de grandes volúmenes de digerido, cuyo almacenamiento, la eliminación y la gestión del digerido representan un desafío para las industrias que buscan consolidar el biogás como una fuente de energía sostenible, constituyendo una problemática que requiere soluciones en el corto plazo (Holm-Nielsen *et al.,* 2009).

Diversos estudios (Holm-Nielsen *et al.,* 2009; Odlare *et al.,* 2008) han demostrado que el impacto negativo de la acumulación de digerido puede atenuarse mediante su uso como fertilizante orgánico o biofertilizante en cultivos agrícolas. Investigaciones realizadas por Bongiovanni *et al.* (2018), Doyeni *et al.* (2021), Głowacka *et al.* (2020), Jin *et al.* (2022), Odlare *et al.* (2008), Pastorelli *et al.* (2021), Riva *et al.* (2016), Van Midden *et al.* (2023), entre otros, reportan mejoras en el rendimiento de cultivos y en diversas propiedades del suelo que respaldan el uso extensivo del digerido. En este contexto, como biofertilizante, el digerido aporta cantidades significativas de nutrientes esenciales para las plantas, y puede sustituir parcialmente a los fertilizantes minerales.

No obstante, la eficacia agronómica del digerido y sus efectos sobre el suelo pueden variar en función del sustrato utilizado y de las condiciones del proceso de digestión (Muscolo *et al.,* 2017). Por ello, es necesario investigar los efectos específicos de cada tipo de digerido sobre las propiedades físicoquímicas, químicas y biológicas del suelo, el rendimiento de los cultivos y en el ambiente, considerando también los posibles riesgos ambientales, como la lixiviación de nitratos y fosfatos o la volatilización de amonio.

El objetivo de este trabajo fue analizar el impacto del uso de digerido en un sistema agrícola, evaluando su influencia sobre la condición físicoquímica, química y biológica del suelo, su capacidad como biofertilizante sobre el cultivo de maíz, y los posibles impactos ambientales negativos derivados de su aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un establecimiento agropecuario de la firma Bioeléctrica (Biomass Crop S.A.), ubicado a 7 km al sur oeste (-33.188294, -64.373474) de la ciudad de Río Cuarto (Córdoba-Argentina), en un suelo clasificado como *Haplustol típico*, según el sistema de clasificación Soil Taxonomy, de textura franca arenosa. El lote provenía de rotaciones soja-maíz en siembra directa, sin aplicación de fertilizantes orgánico en forma previa.

La uniformidad del sitio de ensayo permitió implementar un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones en macro parcelas de 18 m * 130 m. Los tratamientos consistieron en aplicaciones de digerido en dosis crecientes (D1: 90 m^3 ha^{-1}, D2: 180 m^3ha^{-1} y D3: 270 m^3 ha^{-1}), aplicación de fertilizantes inorgánicos (F: fertilizado), con dosis de 120 kg de fosfato diamónico (FDA) más 100 kg de urea incorporados



Figura 1. a) Equipo utilizado para la aplicación de digerido. b) Parcela con el digerido aplicado.

a la siembra, y un control sin aplicación de fertilizante (T: testigo). La aplicación del digerido se realizó mediante un tanque estercolero (figura 1), entre 30 y 40 días previos a la siembra, en aplicaciones sucesivas hasta alcanzar la dosis correspondiente a cada tratamiento. En todos los tratamientos (T, D1, D2, D3 y F) se sembró un cultivo de maíz (*Zea mays* cultivar Dekalb 7210) en siembra directa, a una distancia entre líneas de 52 cm con una densidad de 68.000 semillas por hectárea.

Se evaluó el efecto de fitotoxicidad cuando el cultivo alcanzó el estado fenológico V3, mediante el recuento de plantas establecidas por metro lineal en los diferentes tratamientos.

Los muestreos de suelo se realizaron cuando el cultivo se encontraba en el estado fenológico de seis hojas complemente desarrolladas (V6) y al finalizar el ciclo. Para ello se tomaron muestras compuestas de suelo en tres repeticiones por tratamiento. Las profundidades de muestreo en V6 fueron las siguientes: 0-20; 20-40 y 40-60 cm determinando pH, CE y nitratos para todas las profundDidades y fósforo hasta los 40 cm.

Al finalizar el ciclo del cultivo, el muestreo del suelo se realizó en las profundidades: 0-5; 0-20; 20-40; 40-60; 60-100 y a 200 cm, para analizar:

- pH y conductividad eléctrica (CE) (hasta los 100 cm de profundidad),
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (0-20 cm de profundidad),
- Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio intercambiables (0-20 cm de profundidad),

- Materia orgánica total (MO) (0-20 cm de profundidad),
- Fósforo extractable (hasta los 60 cm de profundidad),
- Nitrógeno de Nitratos (hasta los 200 cm de profundidad),
- Respiración basal de microorganismos del suelo (0-5 cm de profundidad).

En Page *et al.* (1982) y USDA (1999) se encuentran descripta la metodología aplicada en los análisis químicos, fisicoquímicos y microbiológicos de esta experiencia.

Caracterización del digerido

El digerido utilizado para el ensayo fue provisto por la empresa Bioeléctrica. Su composición (tabla 1) cumple con la reglamentación de estándares y normas de vertidos para la preservación del recurso hídrico de la provincia de Córdoba (MAAySP, 2017). A partir de esta composición, se calculó la cantidad de nutrientes aportados según cada dosis aplicada.

La validez estadística de los resultados se comprobó mediante análisis de varianza (ANOVA) y prueba de comparación de medias de LSD Fisher ($p < 0,05$) utilizando el software InfoStat (Di Renzo *et al.*, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSION

La aplicación de digerido y de fertilizantes inorgánicos aportó al suelo materia orgánica (MO) y nutrientes. En la tabla 2 se presentan los valores de MO y de nutrientes, expresados en kg ha^{-1}, aportados por los tratamientos, considerando las dosis de digerido y del fertilizante inorgánico.

Efecto de la aplicación de digerido sobre la implantación del cultivo de maíz

Los resultados estadísticos no mostraron diferencias significativas en el stand de plantas entre tratamientos en el estado V6 ($p > 0,05$), registrándose un valor promedio de 3,5 ± 0,3 plantas m^{-1} lineal, lo que indica que la aplicación de digerido 30 días antes de la siembra no afectó la germinación ni generó fitotoxicidad en estadios tempranos del cultivo. Esto coincide con lo reportado por Da Ros *et al.* (2018) y Pastorelli *et al.* (2021), quienes señalan que bajas dosis de digerido pueden favorecer la germinación, aunque dosis elevadas podrían inhibirla. Dado que el digerido puede contener contaminantes y posee alta conductividad eléctrica (CE), que puede afectar negativamente la germinación y/o emergencia del cultivo, es fundamental monitorear su aplicación para evitar efectos negativos en las etapas iniciales del cultivo (Insam *et al.,* 2015; Da Ros *et al.,* 2018).

Tabla 1. Composición química del digerido utilizado en el experimento.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
CE (dS m-1)	17,6	Arsénico (mg kg-1)	0,07
pH (upH)	7,76	Cadmio (mg kg-1)	No detectado
Materia Orgánica (%)	54,72	Zinc (mg kg-1)	23
Nitrógeno total (mg kg-1)	1200	Cobre (mg kg-1)	0,94
Calcio (g l-1)	0,15	Cromo total (mg kg-1)	<0,50
Potasio (g l-1)	0,12	Mercurio (mg kg-1)	No detectado
Sodio (g l-1)	0,027	Níquel (mg kg-1)	0,34
Fósforo (%)	0,08	Plomo (mg kg-1)	<0,05
Magnesio (g l-1)	0,10	Sólidos totales (%)	3,64

Fuente de datos: Laboratorio JLA Argentina y Laboratorio de Coloides de Suelo Facultad de Ciencias Agropecuarias – UNC.

Tabla 2. Materia Orgánica y nutrientes (kg ha^{-1}) aportados en los diferentes tratamientos.

	D1	D2	D3	F
MO	4880	9759	14639	-
N total	119,0	237,0	356,0	67,6
Fósforo	72,0	144,0	216,0	55,0
Calcio	13,5	27,0	40,5	-
Magnesio	9,0	18,0	27,0	-
Potasio	10,8	21,6	32,4	-
Sodio	2,4	4,9	7,4	-

Tabla 3. Número de espigas por plantas y rendimiento del cultivo de maíz para los diferentes tratamientos.

	T	D1	D2	D3	F
Rendimiento (qq ha^{-1})	71,37 *c*	126,87 *b*	139,17 *ab*	154,00 *a*	141,23 *a*
N° espigas por planta	0,98 *b*	1,08 *ab*	1,03 *b*	1,21 *a*	0,95 *b*

Distintas letras en la misma fila representan diferencias estadísticas de las medias (prueba Fisher, valor p < 0,05).

Efecto de la aplicación de digerido sobre el rendimiento del cultivo de maíz

El rendimiento en grano mostró incrementos estadísticamente significativos en todos los tratamientos en los que se aplicó digerido o fertilizante inorgánico, en comparación con el testigo (Tabla 3). Los rendimientos más bajos se observaron en el tratamiento testigo, mientras que los valores intermedios se registraron en D1 y D2. En contraste, los tratamientos F y D3 obtuvieron los mayores rendimientos, con un aumento promedio del 98% respecto al testigo. Resultados similares han sido reportados por diversos autores, entre ellos Bongiovanni *et al.* (2018), Chilano *et al.* (2019), Doyeni *et al.* (2021), Głowacka *et al.* (2020), Jin *et al.* (2022), Odlare *et al.* (2008), Pastorelli *et al.* (2021) y Riva *et al.* (2016), quienes destacan que los efectos positivos de la aplicación de digerido en las plantas se deben a los nutrientes que contiene. Durante el proceso de digestión anaeróbica en las plantas de biogás, las fracciones orgánicas de la materia prima son degradadas a metano, dióxido de carbono y a residuos digeridos, conservando el nitrógeno principalmente como amonio Además, los nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y trazas de otros elementos necesarios para las plantas permanecen en el digerido, contribuyendo a la mejora en el rendimiento de los cultivos (Holm-Nielsen *et al.,* 2009; Van Midden *et al.,* 2023; Zilio *et al.,* 2023).

Por otro lado, el número de espigas por plantas presentó diferencias significativas entre los tratamientos, observándose mayor número de espigas en D3 (tabla 3). Aunque las segundas espigas no alcanzaron a llenarse completamente, se manifiesta una mayor proliferación, posiblemente atribuida a la mayor disponibilidad de nutrientes (Andrade *et al.,* 2023).

Efecto de la aplicación de digerido sobre características fisicoquímicas y químicas del suelo

Conductividad eléctrica y pH

En el estado fenológico V6 (60–70 días posteriores a la aplicación del digerido), la CE de la solución del suelo presentó incrementos estadísticamente significativos en los tratamientos con las dosis más altas (D2 y D3) respecto de T, D1 y F en los primeros 40 cm de profundidad. En particular, el tratamiento D3 mostró aumentos del 80 % en los primeros 20 cm de profundidad y del 95 % de 20 a 40 cm en comparación con el testigo. La misma tendencia se observó en la profundidad de 40–60 cm, con incrementos del 45 % en D3 respecto de T.

En cuanto al pH del suelo, el tratamiento D3 registró valores significativamente menores que el resto de los tratamientos hasta los 60 cm de profundidad, con reducciones del 4–5 % en relación con el testigo. A pesar de estas variaciones, tanto los valores de CE como de pH se mantuvieron dentro de rangos adecuados para el crecimiento y desarrollo del cultivo (Bonadeo *et al.,* 2017). Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores medios de CE extracto de saturación (dS m^{-1}) y pH en diferentes profundidades de suelo para cada tratamiento en V6.

	T	D1	D2	D3	F
CE					
0-20	0,22 *a*	0,21 *a*	0,31 *b*	0,38 *b*	0,21 *a*
20-40	0,23 *a*	0,27 *ab*	0,32 *b*	0,41 *c*	0,25 *a*
40-60	0,22 *a*	0,21 *a*	0,24 *a*	0,32 *b*	0,20 *a*
pH					
0-20	6,25 *a*	6,22 *a*	6,07 *ab*	6,02 *b*	6,08 *ab*
20-40	6,29 *a*	6,23 *ab*	6,13 *bc*	6,02 *a*	6,21 *ab*
40-60	6,42 *a*	6,30 *ab*	6,26 *b*	6,10 *c*	6,43 *a*

Distintas letras en la misma fila representan diferencias estadísticas de las medias (prueba Fisher, valor p < 0,05).

Tabla 5. Valores medios de CE extracto de saturación (dS m^{-1}) y pH en diferentes profundidades de suelo para cada tratamiento al finalizar el ciclo del cultivo.

	T	D1	D2	D3	F
CE					
0-20	0,20 *a*	0,23 *a*	0,23 *a*	0,35 *b*	0,21 *a*
20-40	0,23 *a*	0,25 *a*	0,27 *a*	0,42 *b*	0,3 *a*
40-60	0,2 *a*	0,24 *a*	0,26 *a*	0,36 *b*	0,23 *a*
60-100	0,21 *a*	0,3 *ab*	0,34 *ab*	0,36 *b*	0,26 *ab*
pH					
0-20	6,49 *a*	6,44 *a*	6,52 *a*	6,5 *a*	6,56 *a*
20-40	6,75 *a*	6,78 *a*	6,75 *a*	6,98 *a*	7,07 *a*
40-60	7,15 *a*	7,02 *a*	7,08 *a*	7,29 *a*	7,07 *a*
60-100	7,61 *a*	8,15 *a*	7,7 *a*	7,71 *a*	7,6 *a*

Distintas letras en la misma fila representan diferencias estadísticas de las medias (prueba Fisher, valor p < 0,05).

La tabla 5 presenta los valores medios de CE y pH del suelo determinados al finalizar el ciclo del cultivo. Se observan aumentos significativos en la CE del suelo con las dosis más altas de aplicación de digerido, con incrementos entre el 66% y 104% respecto al testigo, alcanzando el valor máximo de CE de 0,43 dS m^{-1}. En cuanto al pH, no hubo cambios significativos hasta un metro de profundidad. Se puede apreciar que, aunque se observó una reducción del 4-5% en el pH hasta los 60 cm de profundidad en el muestreo en V6, esta disminución no se mantuvo hasta finalizar el ciclo del cultivo, posiblemente debido a la capacidad buffer del suelo. Si bien, se encontraron los valores más extremos de pH y CE en la dosis más alta de digerido, los valores de pH mínimos fueron de 6,44, cercanos a la neutralidad, lo que no afectaría la disponibilidad de nutrientes (Bonadeo *et al.*, 2017). Mientras que los valores máximos de CE resultaron por debajo del valor establecido como umbral (1,8 dS m^{-1}) para reducir el rendimiento de los cultivos de maíz (Bonadeo *et al.*, 2017).

Los resultados obtenidos son consistentes con investigaciones previas (Bongiovanni *et al.*, 2018; Chilano *et al.*, 2019) en las que se analizaron ambas variables tras la aplicación de digerido en cultivos de maíz y en una rotación centeno-soja, y con Jin *et al.* (2022) sobre cultivos hortícolas. Una de las principales causas para la disminución del pH del suelo después de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizantes inorgánicos es la conversión de amonio a nitrato mediante el proceso de nitrificación, que libera H^+ (Pegoraro *et al.*, 2020).

Tabla 6. Contenido de fósforo (ppm) promedio a distintas profundidades de suelo para cada tratamiento en V6.

Profundidad	T	D1	D2	D3	F
0-20	24,35 *a*	29,49 *ab*	30,92 *ab*	49,57 *b*	25,56 *ab*
20-40	14,01 *a*	15,00 *a*	18,22 *ab*	28,63 *b*	13,61 *a*

Distintas letras en la misma fila representan diferencias estadísticas de las medias (prueba Fisher, valor p < 0,05).

Tabla 7. Contenido de fósforo (ppm) medios en diferentes profundidades de suelo para cada tratamiento al finalizar el ciclo del cultivo.

Profundidad	T	D1	D2	D3	F
0-20 cm	24,10 *a*	26,6 *a*	39,53 *ab*	61,62 *b*	26,48 *a*
20-40 cm	10,01 *a*	9,61 *a*	12,67 *a*	19,18 *b*	10,59 *a*
40-60 cm	10,24 *a*	7,33 *a*	3,86 *a*	20,60 *b*	8,73 *a*

Distintas letras en la misma fila representan diferencias estadísticas de las medias (prueba Fisher, valor p < 0,05).

No obstante, otros estudios han reportado respuestas contrastantes en la variación del pH del suelo, lo que sugiere que la aplicación de digerido no siempre genera valores semejantes, pudiéndose atribuir esta variabilidad, entre otros factores, a la heterogeneidad en la composición de los digeridos, asociada a su origen y al proceso de digestión anaeróbica. Barłóg *et al.* (2020), Doyeni *et al.* (2021) y Riva *et al.* (2016) no observaron diferencias significativas, mientras que Głowacka *et al.* (2020) y Odlare *et al.* (2008) encontraron incrementos del pH en suelos tratados con digerido de biogás y desechos orgánicos, respectivamente.

Contenido de fósforo extractable

La concentración de fósforo en el suelo, evaluada en el estado V6 del cultivo de maíz (Tabla 6), mostró diferencias estadísticas significativas entre el tratamiento D3 y el tratamiento testigo. En D3, los valores de fósforo se duplicaron en comparación con el testigo, alcanzando esta diferencia hasta una profundidad de 40 cm. En el mismo estadio no se presentaron diferencias estadísticas en la concentración de fósforo con el resto de los tratamientos.

Al finalizar el ciclo del cultivo, los valores de fósforos medidos hasta los 60 cm de profundidad, mostraron que el tratamiento D3 duplicó la concentración de fósforo en el suelo con respecto al testigo (tabla 7). Estos resultados permiten deducir que la alta dosis de aplicación de digerido utilizada en D3 produjo acumulación de fósforo en el suelo que podría ser susceptible a la lixiviación generando efectos ambientales negativos.

En este sentido, Barłóg *et al.* (2020), Głowacka *et al.* (2020) y Odlare *et al.* (2008), identificaron incrementos de entre el 10 y el 50% en la concentración de fósforo disponible en el suelo con respecto al control, en ensayos de larga duración. Por otro lado, Nest *et al.* (2015), reportó además de acumulación, la pérdida de fósforo en el suelo por lixiviación, como consecuencia de años con elevadas dosis de fertilización, tanto orgánica como inorgánica.

Contenidos de nitratos

En el estado fenológico V6 del cultivo, se hallaron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de nitratos entre los tratamientos con las dosis más altas de digerido y el resto de los tratamientos (figura 2a). Hasta los 60 cm de profundidad, los valores de nitratos en D3 mostraron un aumento entre el 106% y el 180% en comparación con el testigo.

Al finalizar el ciclo del cultivo (figura 2b), se observó un aumento estadísticamente significativo en la concentración de nitrógeno de nitratos en D3 respecto al testigo, especialmente hasta el metro de profundidad. En los primeros 20 cm los valores se duplicaron, entre los 20 y 60 cm se cuadruplicaron y entre los 60 y 100 cm se triplicaron en relación con el testigo. Sin embargo, a 200 cm de profundidad, no se observaron diferencias en la concentración de nitrógeno de nitratos entre los tratamientos. Esto sugiere que, bajo las condiciones del presente ensayo, no hay evidencia de lixiviación de nitratos, lo que indica que la aplicación de digerido como biofertilizante orgánico no genera un impacto ambiental negativo.

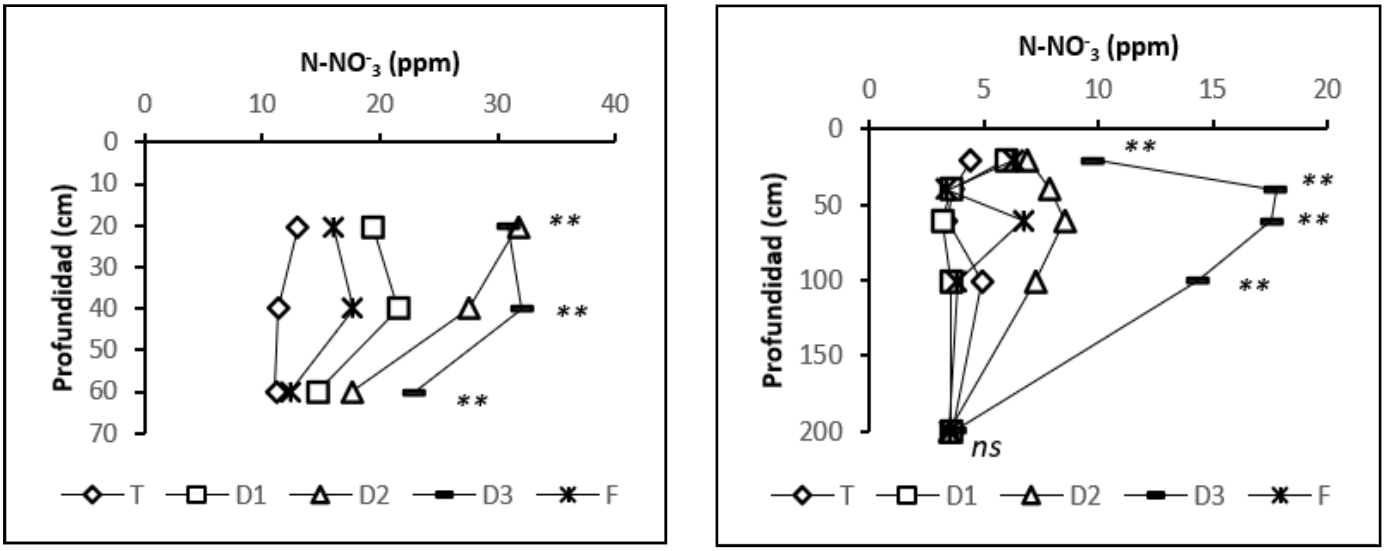


Figura 2. Distribución de nitrógeno de nitratos en el perfil del suelo para los diferentes tratamientos, a) en etapa de seis hojas y b) al finalizar el ciclo del cultivo. ***Indica diferencias estadísticas entre tratamientos dentro de cada profundidad (p < 0,05); ns: no hay diferencias estadísticas entre tratamientos dentro de cada profundidad.*

Zilio *et al.* (2023) identificaron una mayor variabilidad de nitratos en los primeros 25 cm de suelo en un ensayo de monocultivo de maíz de tres años, sin diferencias significativas a un metro de profundidad respecto a fertilizantes minerales, descartando una posible lixiviación. Por su parte, Barłóg *et al.* (2020) encontraron que la aplicación de materiales digeridos anaeróbicamente aumentó la concentración de nitratos respecto a los residuos ganaderos y fertilizantes minerales. Svoboda *et al.* (2013) observaron que mayores aplicaciones de nitrógeno incrementan las pérdidas de nitratos de forma exponencial, siendo similares entre el digerido y el estiércol. Además, señalaron que la asincronía entre la liberación lenta de nitrógeno y la demanda del cultivo es un factor clave. En este sentido, el excedente de nitrato en el suelo, cuando supera el requerimiento del cultivo, representa un nitrógeno residual propenso a la lixiviación, lo que implica la pérdida de N desde el sistema suelo hacia otros compartimentos del agrosistema, con el consiguiente riesgo de contaminación ambiental (Amín, 2017). Este efecto, sin embargo, no se registró en el ensayo, posiblemente debido a la anticipación en la aplicación del digerido respecto al período de máxima demanda del cultivo.

Contenido de materia orgánica

Al finalizar el ciclo del cultivo, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos en los valores de MO en los primeros 20 cm del suelo, con porcentajes que oscilaron entre 2,06 y 2,14%. Según investigaciones realizadas por otros autores (Odlare *et al.,* 2008; Abubaker *et al.,* 2012), los cambios en esta propiedad química suelen requerir ensayos prolongados tras la aplicación de enmiendas orgánicas. En estudios de larga duración, Głowacka *et al.* (2020) y Pastorelli *et al.* (2021) reportaron aumentos en el contenido de carbono orgánico del suelo al aplicar altas dosis de digerido, mientras que Doyeni *et al.* (2021) no encontraron efectos significativos. En conjunto, estas investigaciones destacan el potencial del digerido para incrementar el secuestro de carbono orgánico, dado que aporta MO estabilizada mediante digestión anaeróbica, en la cual las fracciones más lábiles ya fueron degradadas. En nuestro ensayo, el muestreo a 20 cm podría haber limitado la detección de variaciones, sugiriendo la necesidad de análisis estratificados a menor profundidad en futuros estudios.

Bases del complejo de intercambio catiónico

La tabla 8 muestra los valores encontrados en calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiables (cmol.kg suelo^{-1}) y suma de bases (cmol.kg suelo^{-1}) en los primeros 20 cm de suelo al finalizar el ciclo del cultivo para cada tratamiento. No se observaron cambios significativos en la concentración de calcio intercambiable y la suma de bases debido a la aplicación de digerido ni de fertilizante inorgánico.

Tabla 8. Contenido medio de saturación con calcio, magnesio, potasio y sodio intercambiable (%) y saturación con bases (%) hallados en los primeros 20 cm de suelo para cada tratamiento al finalizar el ciclo del cultivo.

	T	D1	D2	D3	F
% Sat. Calcio	59,6 *a*	54,1 *a*	56,6 *a*	58,0 *a*	55,7 *a*
% Sat. Magnesio	10,4 *a*	15,5 *b*	14,7 *b*	15,2 *b*	11,3 *a*
% Sat. Potasio	10,3 *a*	12,2 *b*	12,6 *b*	13,5 *b*	10,4 *a*
% Sat. Sodio	0,7 *a*	1,3 *ab*	1,3 *ab*	1,7 *b*	0,6 *a*
% Sat. con bases	81,0 *a*	83,1 *a*	85,2 *a*	88,4 *a*	78,1 *a*

Medias con una letra común en la misma fila no son significativamente diferentes (p > 0,05).

Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de magnesio, potasio y sodio intercambiables, con valores más elevados en la dosis de mayor aplicación de digerido. En D3 el magnesio incrementó el 45%, el potasio el 24% y el sodio el 170% intercambiable con respecto al testigo. Este aumento de bases en el complejo de intercambio se puede deber a que el digerido aplicado es rico en calcio, magnesio y potasio (Zilio *et al.,* 2023). Głowacka *et al.* (2020) encontraron que la aplicación de digerido influyó en la proporción de cationes en el complejo de cambio, disminuyendo la proporción de iones hidrógeno y aumentando la proporción de iones de calcio, magnesio y potasio, ya que el digerido utilizado contenía altos niveles de los mismos.

Según Bonadeo *et al.* (2017) el complejo de cambio se considera equilibrado (para climas templados) cuando las proporciones son: Ca: 60-70%; Mg: 10-25%; K: 5-15% y Na: < 5%. En este caso, con la aplicación de digerido, aumentó de 10,4% en el tratamiento testigo a 15,2% en la saturación de Mg en la dosis más alta y de 10,3 a 13,5% en la saturación con K. Estos aumentos se ubicaron dentro de los rangos considerados óptimos, contribuyendo a un mejor equilibrio del complejo de cambio del suelo. (Bonadeo *et al.*, 2017). Sin embargo, la aplicación de digerido aumentó el PSI (porcentaje de sodio intercambiable) alcanzando valores de 1,7% en D3. Desde el punto de vista taxonómico, un suelo se considera sódico cuando el PSI supera al 15% de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Bonadeo *et al.,* 2017). Sin embargo, en suelos de la región de Villa María y Río Cuarto (Provincia de Córdoba), se citan umbrales menores de sodicidad, alrededor del 6% de PSI (Milán *et al.,* 2016). Aunque los valores máximos de PSI en este ensayo están lejos del umbral de desequilibrio del complejo de cambio, es una variable a monitorear para evitar efectos de sodificación del suelo. La sodificación podría generar una severa degradación estructural y alteración de las relaciones suelo-agua y suelo-aire, lo que a su vez está asociado a una disminución del rendimiento de los cultivos (Bonadeo *et al.*, 2017).

Efecto de la aplicación de digerido sobre características biológicas del suelo al finalizar el ciclo del cultivo

La evolución de la respiración del suelo durante 14 días de incubación *in vitro* de muestras superficiales de suelo para diferentes tratamientos se presenta en la Figura 3. Se observa que a los 7 días de iniciada la incubación, no hubo diferencias significativas en la respiración basal del suelo entre los tratamientos T, F y D1. Los valores de D2 fueron intermedios y en D3 se observó una mayor respiración, con incrementos del 54% en D2 y del 133% en D3 con respecto al testigo. Entre los 7 y 14 días, la respiración del suelo en D3 aumentó significativamente, triplicándose respecto al testigo. La respiración acumulada a los 14 días, se encontraron incrementos del 110% y del 200% en D2 y D3, respectivamente, en comparación con el testigo.

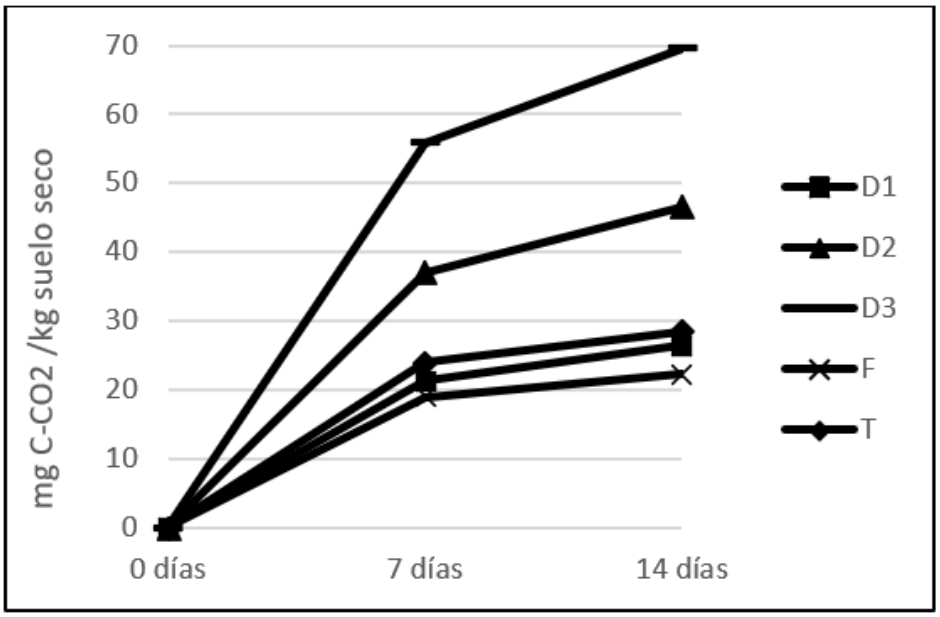


Figura 3. Evolución de la respiración basal del suelo (mg C-CO_2/100g suelo seco) durante los 14 días de incubación para cada tratamiento.

La aplicación de digerido al suelo resultó en el incremento de la actividad microbiana en comparación con los tratamientos con fertilizante inorgánico y sin aplicación. Estos resultados coinciden con lo reportado por Muscolo *et al.* (2017) y Odlare *et al.* (2008), quienes también observaron aumentos en la actividad microbiana del suelo tras la incorporación de digerido. Este hallazgo es relevante en el marco del presente trabajo, dado que los procesos microbianos pueden actuar como indicadores sensibles de los cambios a corto plazo en las propiedades del suelo inducidos por la aplicación de enmiendas orgánicas. En esta línea, estudios de largo plazo sostienen que las propiedades biológicas del suelo responden con mayor rapidez que las propiedades químicas ante distintas prácticas de manejo (Abubaker *et al.,* 2012; Odlare *et al.,* 2008). Asimismo, Van Midden *et al.* (2023) indican que los efectos positivos del digestato sobre la actividad microbiana dependen en gran medida de su composición, la cual está determinada por el tipo de materia prima utilizada en la digestión anaeróbica. Por su parte, Abubaker (2012) destaca que el tipo de suelo también condiciona la respuesta microbiana, siendo más pronunciados los cambios en suelos arenosos, tanto en la estructura de la comunidad microbiana como en la tasa de respiración.

El estudio de las características biológicas del suelo adquiere particular importancia debido a los múltiples beneficios asociados a la aplicación de digerido. Entre ellos se destacan la estimulación de la germinación y el enraizamiento, el aumento en la disponibilidad de nutrientes, la mejora de la estructura del suelo y la mayor tolerancia de las plantas al estrés hídrico y abiótico (Acuña *et al.,* 2006). En este contexto, los resultados obtenidos refuerzan el valor del digerido obtenido a partir de la digestión anaeróbica, como herramienta para mejorar la calidad biológica del suelo.

Evaluación de indicadores de calidad de suelo frente a la aplicación de digerido

Los ensayos realizados muestran que la aplicación de digerido previo a la siembra genera cambios en las propiedades del suelo y en el rendimiento del cultivo de maíz. Estos efectos se representan en la figura 4, donde se analizan las variaciones, según tratamiento, en las condiciones fisicoquímicas, químicas y biológicas del suelo a 20 cm de profundidad; el contenido de P a 60 cm de profundidad; el contenido de nitratos entre los 60 a 200 cm de profundidad al finalizar el ciclo del cultivo y el rendimiento del cultivo de maíz.

La saturación con calcio y el contenido de materia orgánica del suelo no se vieron afectadas por la aplicación de digerido en las dosis evaluadas. En cuanto al pH del suelo, si bien a los 30 días de aplicado el digerido se observaron

valores más bajos, al finalizar el ciclo del cultivo estas reducciones fueron amortiguadas, sin encontrarse diferencias significativas entre los tratamientos. Esto podría atribuirse a la capacidad buffer del suelo.

Por otro lado, la aplicación de digerido produjo un efecto positivo en el rendimiento del cultivo, en la respiración microbiana y en los niveles de nitratos y fósforo disponible en superficie. Además, se observaron aumentos en la saturación con bases y mejoras en el equilibrio del complejo de cambio.

Sin embargo, también se identificaron efectos negativos que podrían derivar en impactos ambientales. Se observó acumulación de nitratos hasta una profundidad de 100 cm y de fósforo hasta 60 cm, lo que incrementa el riesgo de transferencia de estos elementos hacia otros compartimentos del ecosistema. Además, debe considerarse el aumento en el PSI y la CE superficial. Aunque estos factores no afectaron el rendimiento del cultivo en este ensayo, requieren monitoreo para prevenir procesos de sodificación y salinización que podrían deteriorar la calidad del suelo y provocar efectos ambientales negativos.

Los efectos de la aplicación de digerido en las propiedades del suelo y el rendimiento del cultivo dependen de la dosis utilizada. En D1 no se observaron cambios significativos en propiedades que influyen negativamente en el ambiente, como la CE, el PSI, la lixiviación de nitratos y la acumulación de fósforo en profundidad respecto al testigo. Además, no se registraron cambios en el contenido superficial de nitratos y P ni en la respiración microbiana. Sin embargo, se detectaron incrementos en los porcentajes de magnesio y potasio intercambiables, así como en el rendimiento del cultivo.

En D3 se evidenciaron mejoras en indicadores positivos para la calidad del suelo, como un mejor equilibrio del complejo de cambio, mayor contenido superficial de nitratos y P disponible, y una mayor respiración del suelo. No obstante, esta dosis también incrementó indicadores negativos, como la CE, PSI, lixiviación de nitratos y acumulación de fósforo en profundidad, lo que puede representar un riesgo ambiental.

Por su parte, D2 fue la dosis que mostró un mejor equilibrio entre los indicadores de calidad del suelo. Este tratamiento no provocó aumentos en la CE, ni pérdidas potenciales de nitratos por lixiviación, ni acumulación de fósforo en profundidad respecto al testigo. Aunque los valores de PSI se situaron en un rango intermedio, permanecieron por debajo del umbral que afecta negativamente el rendimiento. Además, esta dosis estimuló incrementos en magnesio y potasio intercambiables, así como en la respiración microbiana, con niveles superiores al testigo y menores que los observados en D3. Finalmente, los rendimientos obtenidos con D2 fueron intermedios entre los alcanzados con D3 y los del testigo.

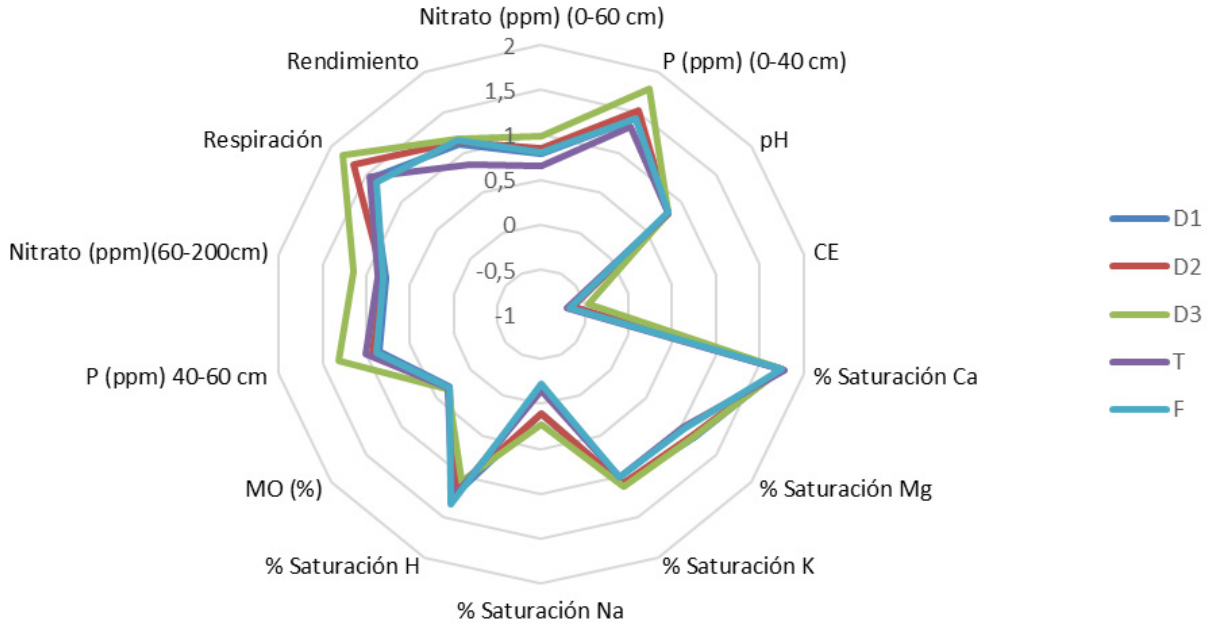


Figura 4. Gráfico síntesis sobre la influencia de la aplicación de digerido y fertilizante inorgánico en propiedades físicoquímica, química y biológica del suelo y en el rendimiento del cultivo de maíz, según tratamiento. *Datos transformados (Log10).*

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de digerido tuvo efectos positivos sobre el rendimiento del cultivo de maíz y produce variaciones en las propiedades del suelo. Se encontraron cambios en el pH del suelo, que fueron amortiguados al final del ciclo del cultivo, evidenciando su capacidad buffer. Además, se hallaron incrementos en la saturación con magnesio y potasio intercambiables en los primeros centímetros del perfil, mejorando el equilibrio del complejo de cambio del suelo. También se detectaron aumentos en la actividad biológica, que, junto con los demás cambios observados, respaldan el valor agronómico del digerido y su potencial para la recirculación de nutrientes.

Sin embargo, el uso de dosis elevadas de digerido también generó efectos adversos sobre la calidad del suelo, como el aumento de la CE, el PSI, la posible lixiviación de nitratos y la acumulación de fósforo en profundidad, lo que puede representar riesgos ambientales. Aunque en las condiciones del ensayo no se detectaron niveles críticos de contaminación, es necesario monitorear variables como la salinización, sodificación y acumulación de nutrientes en profundidad, para asegurar una aplicación sostenible del digerido como biofertilizante a largo plazo.

A través de este estudio, se ha demostrado que el uso de digerido como biofertilizante en sistemas suelo-cultivo puede ser una estrategia efectiva para reducir la contaminación ambiental debido a la acumulación de digerido, disminuyendo a su vez la dependencia de fertilizantes químicos. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad agrícola, sino que también promueve una agricultura más circular y menos dependiente de insumos externos, ayudando a cerrar el ciclo de nutrientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abubaker, J. (2012). Effects of fertilization with biogas residues on crop yield, soil microbiology and greenhouse gas emissions. Tesis doctoral. Swedish University of Agricultural Sciences.

Acuña, O., Peña, W., Serrano, E., Pocasangre, L., Rosales, F., Delgado, E. y Segura, A. (2006). La importancia de los microorganismos en la calidad y salud de suelos. *En Actas de la XVII Reunión Internacional de la Asociación para la Cooperación en las Investigaciones sobre Banano (ACORBAT)* (pp. 222–233).

Amín, S. (2017). Sistema Suelo-Cultivo: una alternativa para depurar nitrógeno residual de los tambos. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Andrade, F., Otegui M. E., Cirilo A. y S. Uhart (2023). *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz*. 1ra ed. Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Barłóg, P., Hlisnikovský, L., y Kunzová, E. (2020). Effect of digestate on soil organic carbon and plant-available nutrient content compared to cattle slurry and mineral fertilization. *Agronomy*, *10*(3), 379. **https://doi.org/10.3390/agronomy10030379**

Bonadeo, E., I. Moreno, M. Bongiovanni; R. Marzari; M. J. Ganum Gorriz. (2017). *El sistema suelo-planta principios generales*. UniRío Editora.

Bongiovanni M.D., Marzari R. y Amín, S. (2018). Uso de digestato como biofertilizante derivado de la generación de Biogás. *Actas XXVI Congreso Argentino Ciencia del Suelo*. Tucumán. pp 448-452.

Chilano Y., Bongiovanni M.D., Amín M.S., Marzari R., Mattalia M.L., Barlasina M.V. y Sgarlatta B. (2019). Efecto de digestato de biogás como fuente de nutrientes en una rotación centeno-soja. *Edición especial - Revista Científica FAV-UNRC Ab Intus2019* (pp142).

Da Ros, C., Libralato, G., Ghirardini, A. V., Radaelli, M., y Cavinato, C. (2018). Assessing the potential phytotoxicity of digestate from winery wastes. *Ecotoxicology and environmental safety*, *150*, 26-33. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.029

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C.W. (2016). Infostat (versión 2016) [Software]. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. http://www.infostat.com.ar

Doyeni, M. O., Stulpinaite, U., Baksinskaite, A., Suproniene, S. y Tilvikiene, V. (2021). The effectiveness of digestate use for fertilization in an agricultural cropping system. *Plants*, *10*(8), 1734. **https://doi.org/10.3390/plants10081734**

Głowacka, A., Szostak, B. y Klebaniuk, R. (2020). Effect of biogas digestate and mineral fertilisation on the soil properties and yield and nutritional value of switchgrass forage. *Agronomy*, *10*(4), 490. **https://doi.org/10.3390/agronomy10040490**

Holm-Nielsen, J. B., Al Seadi, T., y Oleskowicz-Popiel, P. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource technology*, 100(22), 5478-5484. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046

Insam, H., Gómez-Brandón M. y Ascher, J. (2015). Manure-based biogas fermentation residues–Friend or foe of soil fertility?. Soil Biology and Biochemistry, 84, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.006

Jin, K., Ran, Y., Alengebawy, A., Yang, G., Jia, S. y Ai, P. (2022). Agro-environmental sustainability of using digestate fertilizer for solanaceous and leafy vegetables cultivation: Insights on fertilizer efficiency and risk assessment. *Journal of Environmental Management*, *320*, 115895. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115895

MAAySP. Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos (2017). *Boletín oficial de la provincia de Córdoba*, Nº 81.

Milán, C., Bonadeo E., Manzotti M. y Dell'Oso A. (2016). Técnica del índice de dispersión para el reconocimiento de suelos sódicos. En Actas del *XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. UniRío Editora.

Muscolo, A., Settineri, G., Papalia, T., Attinà, E., Basile, C., y Panuccio, M. R. (2017). Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes: Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem. *Science of the Total Environment*, *586*, 746-752. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.051

Nest, T. V., Ruysschaert, G., Vandecasteele, B., Cougnon, M., Merckx, R. y Reheul, D. (2015). P availability and P leaching after reducing the mineral P fertilization and the use of digestate products as new organic fertilizers in a 4-year field trial with high P status. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202, 56-67. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.12.012

Odlare, M., Pell, M. y Svensson K. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. Waste Managemen, 28(7), pp. 1246-53. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.005

Page, A. L., Miller, R. H. y Keeney, D. R. (1982). *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy & Soil Science Society of America.

Pastorelli, R., Valboa, G., Lagomarsino, A., Fabiani, A., Simoncini, S., Zaghi, M. y Vignozzi, N. (2021). Recycling biogas digestate from energy crops: effects on soil properties and crop productivity. *Applied Sciences*, *11*(2), 750. **https://doi.org/10.3390/app11020750**

Pegoraro, V. R., Cazorla, C. R., Bachmeier, O., Baigorria, T., Boccolini, M. F., Ortiz, J., Lorenzon, C., Hang S. y Zubillaga, M. S. (2020). Impacts of different pig slurry application methods on soil quality indicators in a maize-soybean cropping sequence in the sub-humid pampas of Argentina. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 9, 259–272. DOI:10.30486/IJROWA.2020.674424

Riva, C., Orzi, V., Carozzi, M., Acutis, M., Boccasile, G., Lonati, S., F Tambone; G D'Imporzano y Adani, F. (2016). Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. *Science of the Total Environment*, *547*, 206-214. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156

Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, C., Kage, H. y Herrmann, A. (2013). Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. Soil Tillage Research. 130: 69–80. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006.

USDA. (1999). *Soil Quality Test Kit Guide*. USDA-Agriculture Research Service, Soil Conservation Service, Washington (DC), EEUU. 82 p.

Van Midden, C., Harris, J., Shaw, L., Sizmur, T. y Pawlett, M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life: A review. *Applied Soil Ecology*, 191, 105066. https://doi.org/10.1016/j.apsil.2023.105066

Zilio, M., Pigoli, A., Rizzi, B., Goglio, A., Tambone, F., Giordano, A. y Adani, F. (2023). Nitrogen dynamics in soils fertilized with digestate and mineral fertilizers: A full field approach. *Science of The Total Environment*, 161500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161500