Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria

2026 15:1-13.
Artículo aceptado en Noviembre de 2026
Versión online.

Manejo de residuos en el agro. Aspectos agronómicos y ambientales

Waste management in agriculture. Agronomic and environmental aspects

Miguel Angel Taboada [1, 2]

[1]Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Argentina.

[2] Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

ID Autor: Miguel Angel Taboada:
https://orcid.org/0000-0003-3952-0583

Autor para correspondencia:
Correo electrónico: mtaboada@agro.uba.ar.

Resumen

Existe diverso tipo de residuos y desperdicios que pueden ser manejados en el campo. Algunos se originan en el campo mismo, otros provienen de fuentes externas como agroindustrias, industrias, y municipios. Su posibilidad de aplicación está sujeta o limitada por esquemas regulatorios basados en la concentración de EPTs y patógenos, y luego por las posibilidades de logística, en cuanto a almacenamiento, protección y transporte. El valor agronómico de los residuos se relaciona con su aporte de nutrientes vegetales y su capacidad de mejorar la salud de los suelos. En general, solo los residuos de origen municipal o industrial pueden presentar niveles elevados de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), como plomo, cromo y cadmio, y de patógenos, como coliformes fecales y Salmonella. En nuestro país, la regulación vigente permite valorizar biosólidos en plantaciones forestales. Las plantaciones de eucalipto han mostrado elevada capacidad de respuesta en volumen de madera a la aplicación de biosólidos. Otros residuos de agroindustria, como los derivados de la producción de maíz semilla, tienen elevado potencial de usar altas dosis y poder secuestrar carbono en los suelos.

Palabras clave: residuos agrícolas, residuos de agroindustria, biosólidos municipales, forestales, secuestro de carbono

Abstract

Various types of waste and residues can be managed in agricultural or rural settings. Some originate on-site, while others come from external sources such as agro-industries, manufacturing industries, or municipalities. Their potential for application is governed or constrained by regulatory frameworks—based on the concentration of Potentially Toxic Elements (PTEs) and pathogens—as well as by logistical considerations, including storage, containment, and transport. The agronomic value of these residues lies in their contribution of plant nutrients and their capacity to improve soil health. In general, only waste of municipal or industrial origin is likely to contain high levels of Potentially Toxic Elements (PTEs)—such as lead, chromium, and cadmium—or pathogens, such as fecal coliforms and *Salmonella*. In our country, current regulations allow for the beneficial use of biosolids in forest plantations. Eucalyptus plantations, in particular, have shown a strong response to the application of biosolids in terms of increased timber volume. Other agro-industrial residues—such as those derived from seed-corn production—offer significant potential for application at high rates, while also contributing to carbon sequestration in the soil.

Keywords: agricultural waste, agro-industrial waste, municipal biosolids, forestry residues, carbon sequestration

Origen de los residuos

Existen diversos tipos de residuos y desperdicios que pueden ser manejados en el campo. Algunos se originan en el campo mismo, otros provienen de fuentes externas como agroindustrias, industrias, y municipios. La Figura 1 muestra qué tipo de residuos pueden ser manejados en el campo. Sus limitaciones para su uso dependerán de la presencia de los denominados Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs), y en relación con ello, de los marcos regulatorios existentes a nivel nacional, provincial y municipal.

Los residuos pueden productos primarios, sin ningún tratamiento posterior, o tratados, que han sido sujetos procesos de digestión aeróbica o anaeróbica, con la eventual producción de "digestatos". De cualquier forma, su posibilidad de aplicación está sujeta o limitada por las posibilidades de logística, en cuanto a almacenamiento, protección y transporte.

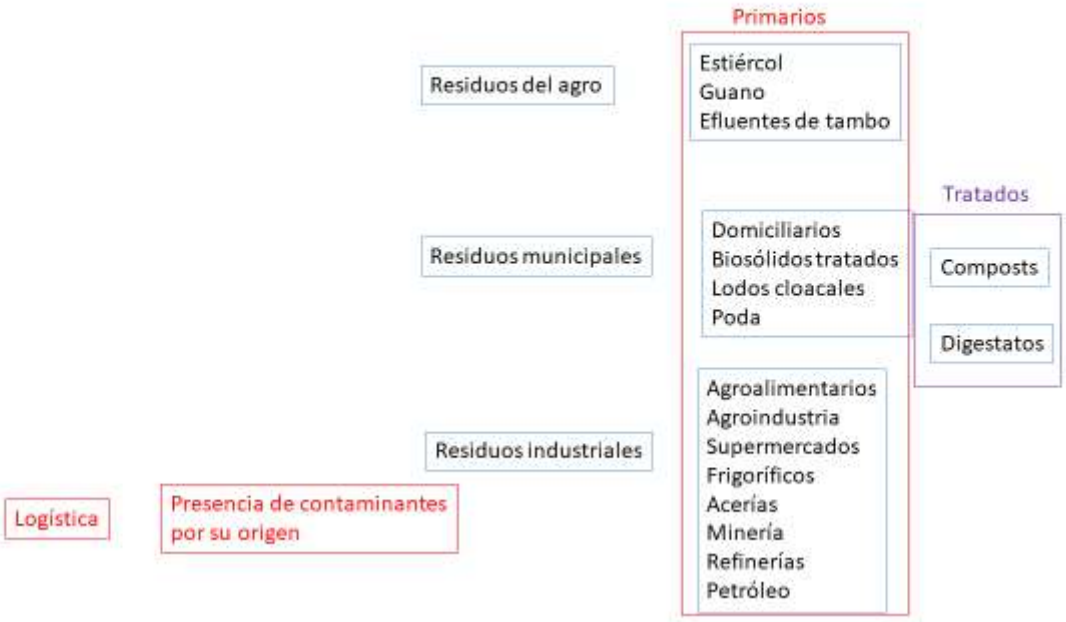

Figura 1. Tipos de residuos, su origen y vínculo con la sustentabilidad,

Los residuos producidos en el campo mismo incluyen diferente tipo de estiércoles animales, guanos de ave, y efluentes de tambo. Desde ya, pueden incluirse muchos mas, si se amplia la mirada a los desperdicios del procesamiento de las producciones de huerta, frutales, y corrales que pueden verse detalladas en la Figura 2.

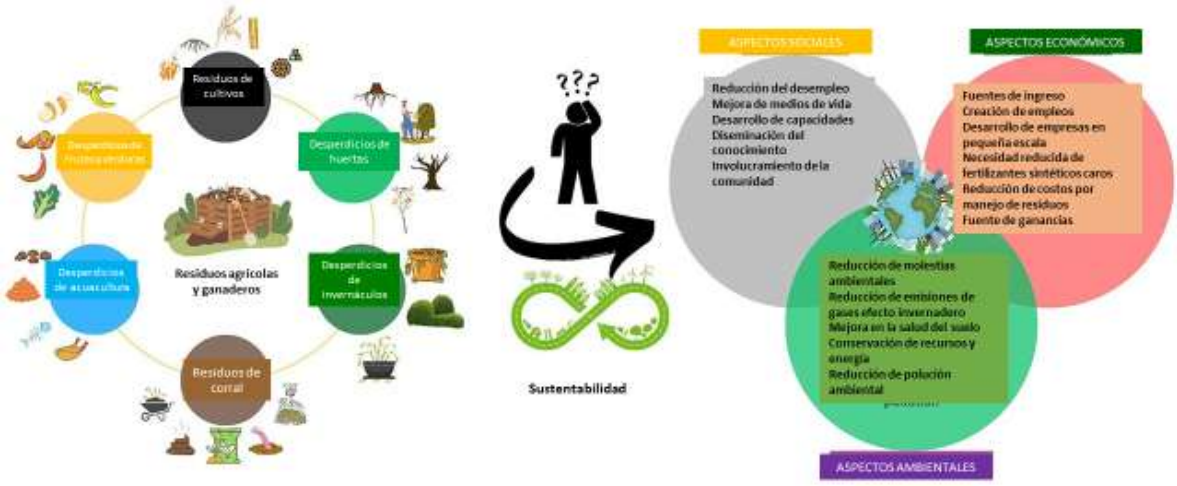

Figura 2. Residuos agrícolas y ganaderos, y aspectos sociales, económicos y ambientales que se relacionan con su manejo y la sustentabilidad. Adaptado de Sheer et al. (2024).

Las estrategias de economía circular, como la valorización y transformación de los residuos agroganaderos en biofertilizantes o enmiendas del suelo, mediante compostaje, pirolisis o digestión anaeróbica, ofrecen alternativas viables para restaurar la salud del suelo y reducir al mismo tiempo el impacto ambiental. En un estudio realizado en España, Marquez Moreno y colegas (2025) realizan un análisis comparativo de varios materiales derivados de biomasa, composts, té de compost, digestatos anaeróbicos, purines de ganado y biocarbones producidos a partir de diversas materias primas. Los biocarbones y los compost 100% vegetal mostraron las propiedades agronómicas más favorables, incluyendo un alto contenido en carbono, estabilidad y perfiles equilibrados de nutrientes, sin efectos adversos sobre la germinación de las semillas.

El valor agronómico de los residuos se relaciona con su aporte de nutrientes vegetales y su capacidad de mejorar la salud de los suelos. En una revisión de 37 estudios, Bebber y Richards (2022) encontraron que la diversidad funcional de microorganismos de suelos fue 2,8 % mayor en fertilización mineral sintética con NPK, comparado con testigos no fertilizados, 7,0 % mayor en fertilización orgánica, y 3,8 % mayor en fertilización orgánica comparado con NPK. En ese mismo estudio se halló que la diversidad taxonómica de bacterias y arqueas no fue significativamente diferente entre NPK y los tratamientos con orgánicos, pero fue en promedio 2,9 % mayor en fertilización orgánico vs testigo, y 2,4 % mayor en orgánico versus vs NPK. Por su parte, la diversidad taxonómica de hongos no fue significativamente diferente entre los pares de tratamiento.

Un aspecto relevante a tener en cuenta de los biosólidos aplicados a los suelos es su “residualidad”, que hace una parte importante (15%) de N aplicado quede disponible para el año subsiguiente. Esto se visualiza en un esquema que

surge de trabajos realizados a campo con biosólidos de plantas depuradoras (Figura 3).

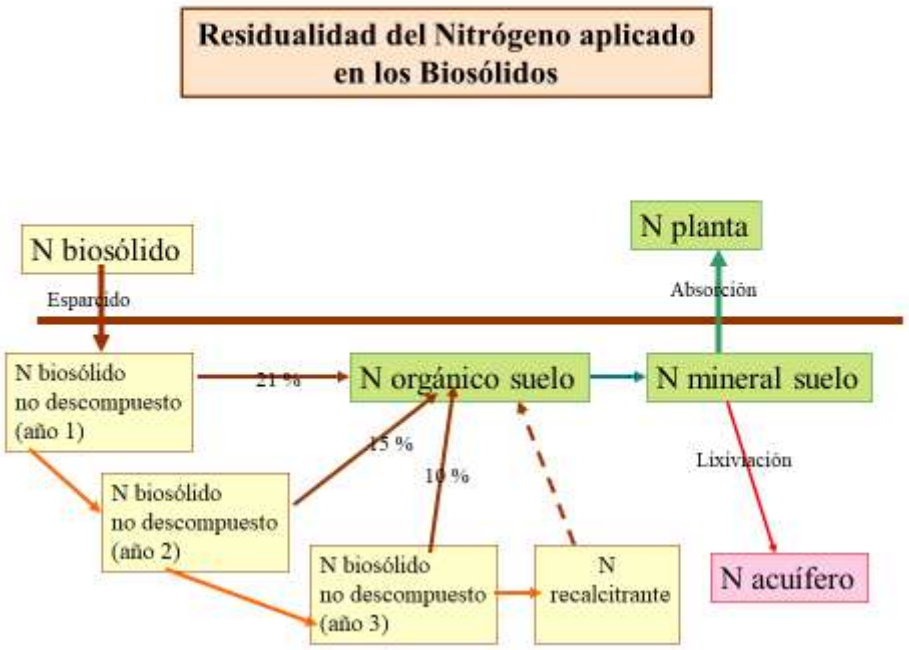

Figura 3. Residualidad del nitrógeno aplicado en los biosólidos. Fuente: Informe Final Convenio Aguas Argentinas S.A. - Facultad de Agronomia, UBA. nov. 2004.

Factibilidad de valorización agrícola de biosólidos de plantas depuradoras

Regresando a la Figura 1, resta analizar los residuos de origen municipal y los industriales, en los cuales ya entra a tallar los análisis de riesgo por la eventual presencia de EPTs, cuyo análisis se hará mas adelante.

El manejo de los residuos del agro se inserta dentro de la economía circular. Esta fomenta la reutilización y el reciclaje de recursos, al tiempo que reduce los residuos, lo que en última instancia contribuye a disminuir la contaminación ambiental e impulsa la eficiencia económica (Sheer et al. 2024). El esquema conceptual se puede visualizar en la Figura 2. El impacto del manejo de residuos en la sustentabilidad se ejerce en las direcciones de los aspectos ambientales, los económicos y los sociales.

Los aspectos ambientales son quizás los más evidentes. Se incluyen la reducción de molestias ambientales y de las emisiones de gases efecto invernadero, la mejora en la salud del suelo, la conservación de recursos y energía, y la reducción de la polución ambiental. Entre los aspectos económicos se cuenta la generación de fuentes de ingresos, la generación de empleos, el desarrollo de empresas en pequeña escala, la necesidad reducida de uso de fertilizantes sintéticos, usualmente mas caros, o menor accesibilidad a pequeños productores, la reducción de costos por manejo de residuos, y la generación de fuentes de ganancias. Por último, los aspectos sociales que suelen menos percibidos. Algunos son efectos indirectos, como la reducción del desempleo, o la mejora de los medios de vida. Otros son mas perceptibles, como el desarrollo de capacidades humanas, la mayor diseminación del conocimiento, y el mayor involucramiento de la comunidad local.

Logística para almacenamiento, transformación y esparcido

Una búsqueda por Inteligencia Artificial explica que la logística para almacenamiento, transformación y esparcido abarca la cadena de operaciones dedicada a recibir, resguardar, modificar o acondicionar materiales, y distribuirlos o aplicarlos en el terreno o destino final (común en sectores como la agricultura, la construcción, la gestión de áridos o el tratamiento de fertilizantes/compost).

Almacenamiento: en el agro es fundamental la protección de los materiales frente a factores climáticos (humedad, calor, contaminación cruzada) mediante silos, naves techadas, lonas o patios de acopio delimitados.

Procesamiento o mezcla: es la adaptación del material según la necesidad operativa (por ejemplo, molienda, cribado, mezcla de nutrientes o fertilizantes, o pre-ensamblaje). Eventualmente el Valor agregado que consiste en su fraccionamiento en bolsas, envasado, etiquetado o control de calidad previo a la etapa de aplicación o salida.

Carga y despacho: Transferencia de los materiales procesados a vehículos de transporte (tolvas, camiones volcadores, maquinaria de aplicación). La Figura 4 el trabajo de una estercoladora de descarga lateral, aplicando biosólido un un suelo agrícola. muestra En el agro, ello incluye la ejecución controlada del esparcido, asegurando dosificación uniforme y cumplimiento de normativas ambientales o de seguridad, como el geo-posicionamiento de los sitios de aplicación. Se busca garantizar que el suelo reciba los nutrientes exactos en el momento óptimo del ciclo de cultivo, minimizando mermas y costos operativos.



Figura 4. Aplicación de biosólidos en un suelo agrícola, con una estercoladora de descarga lateral.

Elementos potencialmente tóxicos (EPT´s) que pueden estar presentes en residuos

Según la IA, los EPTs son sustancias químicas —principalmente metales y metaloides— que pueden generar efectos perjudiciales en los organismos vivos y en el medio ambiente, incluso en concentraciones bajas. La mayoría de los PTE no pueden degradarse por vía microbiana o química, pueden permanecer en los suelos durante largos periodos. Además de constituir una amenaza para la litosfera, pueden transportarse a otros ámbitos ambientales circundantes mediante el movimiento del agua, la circulación atmosférica y la transmisión biológica, lo cual puede alterar gravemente el equilibrio ecológico. La acumulación de PTE en los suelos entraña graves riesgos para la salud de los organismos superiores, provocando diversas enfermedades y trastornos; asimismo, existe una relación significativa entre la presencia de PTE y los efectos tóxicos en los seres humanos. En los suelos naturales, los PTE se acumulan como consecuencia de la meteorización de rocas y minerales (Nieder et al. 2024).

Si bien estudios como los de Nieder et al. (2024) han centrado su atención en metales y elementos traza como arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), y plomo (Pb), que son altamente tóxicos y no desempeñan funciones fisiológicas en la biota, tratándose de los riesgos que pueden encarnar el uso de residuos en el agro, la lista debiera incluir también a patógenos biológicos como restos de helmintos, áscaris, etc, virus, bacterias coliformes fecales y Salmonella, hongos, restos de antibióticos, etc, y los llamados químicos orgánicos persistentes polutantes (POPs). Los POPs incluyen a residuos de petróleo y de refinería de hidrocarburos y restos de pesticidas.

El riesgo por la aparición de EPTs, patógenos biológicos y POPs se focaliza principalmente en los residuos de origen municipal e industrial (Fig. 1). No obstante, en el caso de algunos estiércoles y biosólidos también debe prestarse atención a la presencia de metales y elementos traza, como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), cinc (Zn), cobalto (Co), y molibdeno (Mo), fundamentalmente por su riesgo de transferencia a la cadena de alimentación humana. En otros sitios que han sido afectados por actividad nuclear, o por accidentes nucleares (por ejemplo, Chernobyl), debe prestarse también atención a la eventual presencia de elementos radioisótopos radioactivos, como restos de radioisótopos.

Casos de estudio en Argentina

Potencial de escalamiento del uso de biosólidos de plantas depuradoras en plantaciones forestales

Este caso surge del proyecto "Valorización agrícola de biosólidos de plantas depuradoras en suelos cercanos a la ciudad de Buenos Aires", pionero para la Argentina en ese momento, que se desarrolló desde la Facultad de Agronomía UBA con la empresa Aguas Argentinas . SA, que gestionó la potabilización y distribución del agua, y el tratamiento de efluentes cloacales de la ciudad de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires hasta 2005. El proyecto se desarrolló entre 1995 y 2002, y una

de sus líneas fue la aplicación a forestales, que estuvo a cargo del Ing. Agr. Esteban Borodowski, quien hizo su tesina de grado con este tema, bajo la dirección del Ing, Agr, Raúl S. Lavado.

La ubicación del ensayo fue en la localidad de Jáuregui, Partido de Luján, Prov. de Bs. As., a 85 km de Capital Federal sobre suelo Argiudol típico, illítico. De textura franco-arcillo-limosa. Con perfil profundo (2,25 m), bien drenado, no alcalino, no salino. El horizonte Bt se encuentra a los 36 cm y el C a los 154 cm.

La toma de decisión para calcular la dosis se realizó tomando como base Norma Técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales (Resolución 410/2018) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable 2018). Esta Resolución establece criterios técnicos para el tratamiento, reutilización, disposición o eliminación de estos materiales para proteger la salud humana y el ambiente. Divide a los biosólidos en **Clase A** (sin restricciones de uso agronómico o paisajístico debido a su alto grado de estabilización y saneamiento) y **Clase B** (con condicionamientos de aplicación y manejo).

Una de las bases para decidir la dosis a aplicar es la concentración de EPTs y el nivel de patógenos en biosólidos (Figura 5).

CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXIC EN BIOSÓLIDOS

PARÁMETRO	MÉTODOS ANALÍTICOS MÉTODOS DE DIGESTIÓN	VALOR DE REFERENCIA (mg/kg materia seca)
Arsénico	Método EPA 3050 A; 3050 B; 3051 A	75
Cadmio		40
zinc		4000
Cobre		1750
Cromo Total		1500
Mercurio		25
Niquel		400
Plomo	Método SM 3112 B, 3113 B; 3114 B; 3120 B; 3125 B Método EPA 200.7; 200.8; 200,9	1200

NIVEL DE PATÓGENOS EN BIOSÓLIDOS. CLASIFICACIÓN

PARÁMETRO	MÉTODO DE DETERMINACIÓN	BIOSÓLIDOS CLASE A BIOSÓLIDOS CLASE B
Coliformes fecales	Método SM 9221 E; 9222 D	< 1000 NMP/g MS
		< 2.000.000 NMP/g MS
Salmonella	Método SM 9260 D	< 3 NMP/4 g MS

Figura 5. Concentración máxima de Elementos Potencialmente Tóxicos y nivel permitido de patógenos permitidos en en biosólidos, según Resolución 410/2018.

La dosis de aplicación de biosólidos se decide en base al EPT mas limitante. Este ejercicio de cálculo de dosis se muestra en la Tabla 1. La Dosis Anual de Aplicación (DAB) se obtiene del cociente entre la Concentración media de EPTs en los biosólidos y Carga máxima de aplicación según Res.410/2018.

Tabla 1. Cálculo de la dosis anual posible de biosólido en base a la concentración medio de EPTs, y la carga máxima de aplicación (Res.410/2018).

	C = Concentración media (mg/kg MS)	CAA = Carga máxima de aplicación (kg/ha)	DAB = Dosis Anual de Aplicación (Tn/ha año)
Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT)	**Laboratorio AySA-biosólidos PN)**	**Disposición 410/18**	**DAB = (CAA x 1000)/C**
Arsenico	14	1.8	129
Cadmio	2	0.5	250
Cinc	912.5	100	110
Cobre	202	40	198
Cromo total	44	10	227
Niquel	24.5	10	408
Plomo	40	50	1250

En el ensayo realizado, que fue previo a la generación de la Res. 410/2018, se aplicó biosólidos sobre plantaciones forestales de pino elioti (Pinus elliottii) implantado en 1999 a 3 m x 3 m (1ra. aplic. < 1 año), y de eucalipto (Eucalyptus dunnii) implantado en 1997 a 3,7 x 2,5 m (1ra. aplic. < 3 años). Los tratamientos fueron:
Test. : Testigo.
Bio. 1: 14 t/ha (en materia seca) de biosólido (dos aplicaciones de 7 t/ha cada una (al año)).
Bio. 2: 28 t/ha (en materia seca) de biosólido (dos aplicaciones de 14 t/ha cada una (al año)).

La Figura 6 muestra el momento de aplicación de biosólido en la plantación de eucalipto. Los resultados de mediciones realizadas de diámetro, altura y volumen fueron mas altos en eucalipto que en pino. Los mayores crecimientos fueron para Bio 2 a partir de la primera medición con respecto al testigo (224% en 1er año y 186% en 2do año), mientras que para Bio 1 fueron en las tres últimas mediciones con respecto al testigo (90% y 88%, respectivamente).



Figura 6. Aplicación al voleo en superficie de biosólido sobre cultivo de E. dunnii, con estercolera de descarga lateral con capacidad para 5.000 kg.

Según este cálculo, el EPT que limitó la dosis máxima a aplicar fue el cinc (Zn). La concentración media de EPTs surge de la mediana estadística de 17 análisis desde noviembre 2021 a noviembre 2023 de los biosólidos salidos de la planta depradora norte de AySA de San Fernando, que recibe y trata los líquidos cloacales de la red troncal provenientes de los partidos de San Fernando, Tigre, San Isidro, San Martín y San Vicente. Esta planta depuradora aplica procesos biológicos controlados (lodos activados) para eliminar sólidos y materia orgánica antes de verter el agua tratada. Los barros resultantes se reutilizan como relleno sanitario.

Los resultados mostraron mayores niveles de respuesta en eucalipto que en pino. El incremento en volumen de madera por planta fue en el primer año 90% para Bio1 y 224% para Bio2. En el segundo año los incrementos en volumen de madera fueron 88% y 186%, respectivamente. Estos resultados permiten concluir que es posible el uso de biosólidos en dosis de hasta 16 Tn MS/ha, o aun mayores en suelos cercanos a la ciudad de Buenos Aires.

Balance de emisiones y absorciones de gases efecto invernadero usando Directrices de IPCC.

Para calcular el balance de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) en el ciclo completo, que incluye el tratamiento de los lodos y su valorización agrícola deben aplicarse las Directrices de IPCC en sus diferentes versiones, según se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Sistemas de tratamiento y valorización agrícola de aguas residuales y de descarga

Los lodos que resultan de los sistemas de tratamiento centralizados en plantas depuradoras de aguas residuales pueden recibir distinto tipo de tratamientos, según sea el volumen de agua a tratar. En grandes urbes como el Área Metropolitana Buenos Aires (AMBA), la Planta Depuradora Norte de San Fernando trata a sus lodos en forma aeróbica y anaeróbica sucesiva. Ambos procesos de digestión tienen por finalidad abatir la concentración de compuestos volátiles de carbono orgánico, que dan malos olores y atraen vectores transmisores de enfermedades. También se reduce el nivel de patógenos (Coliformes fecales y Salmonella). Estos lodos tratados que salen del proceso de digestión anaeróbica en digestores reciben el nombre de biosólidos.

Los biosólidos producidos tienen varios destinos alternativos, de los cuales los más usuales en el AMBA son el relleno sanitario (CEAMSE) y el "land farming". En el caso de la valorización agrícola con forestales, esas emisiones son evitadas. Las emisiones de los sistemas de tratamiento y las de destino de los lodos y biosólidos se calculan usando las Directrices IPCC 2006 refinadas en 2019, sector Residuos (IPCC 2019a).

En suelos forestales, las emisiones deben calcularse las emisiones generadas de óxido nitroso (N_2O) y de dióxido de carbono (CO_2), usando las Directrices de IPCC 2006 Refinadas en 2019 (IPCC 2019b).

Uso de residuos de la industria de semilla de maíz en criaderos de cerdos

La industria de maíz para de semilla genera residuos como chala, granza y marlo de la espiga de maíz. Estos residuos se generan en grandes volúmenes, que si no se usan, suelen acumularse en enormes pilas cerca de las plantas de procesamiento (Figura 8).



Figura 8. Pila de residuos de procesamiento de espigas de maíz, en cercanías de ruta 31 (provincia de Buenos Aires).

Una opción posible es su uso como abono en los suelos, dado su contenido importante de nitrógeno. Su impacto en el balance de emisiones GEI surge de las emisiones de N_2O y del potencial secuestro de carbono en los suelos. Los resultados para valorización agrícola se muestran en la Figura 9. Se observa la gran influencia de la captura de carbono por los suelos (secuestro de carbono). Cuando las dosis de aplicación son mas altas que 5 tn MS / ha, la capacidad de secuestro supera a las emisiones GEI. Este balance no incluye al carbono en la madera producida.

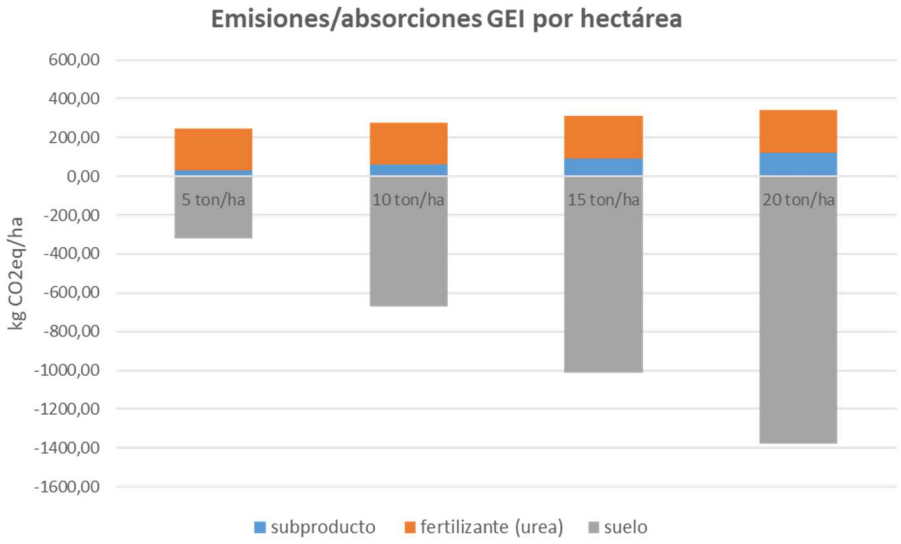

Figura 9. Emisiones y absorciones de gases efecto invernadero (GEI), como resultado de aplicar residuos de la industria de la semilla de maíz en un suelo Argiudol de la Pampa Ondulada.

Conclusiones

Existen diversos tipos de residuos y desperdicios que pueden ser manejados en el campo. Algunos se originan en el campo mismo, otros provienen de fuentes externas como agroindustrias, industrias, y municipios. En general, solo estos últimos residuos pueden presentar niveles elevados de EPTs y de patógenos.

Su posibilidad de aplicación está sujeta o limitada por esquemas regulatorios basados en la concentración de EPTs y patógenos, y luego por las posibilidades de logística, en cuanto a almacenamiento, protección y transporte.

El valor agronómico de los residuos se relaciona con su aporte de nutrientes vegetales y su capacidad de mejorar la salud de los suelos. Hasta un 15% de N aplicado queda disponible para el año subsiguiente, mostrando así residualidad.

La valorización agrícola de los biosólidos que salen de plantas depuradoras es un desafío importante, que permitiría evitar o minimizar el destino de esos biosólidos a destinos de disposición final.

En nuestro país, la regulación vigente permite valorizar biosólidos en plantaciones forestales. Las plantaciones de eucalipto han mostrado elevada capacidad de respuesta en volumen de madera a la aplicación de biosólidos.

Otros residuos de agroindustria, como los derivados de la producción de maíz semilla, tienen elevado potencial de usar altas dosis y poder secuestrar carbono en los suelos.

Literatura citada

Bebber, D. P., & Richards, V. R. (2022). A meta-analysis of the effect of organic and mineral fertilizers on soil microbial diversity. Applied Soil Ecology, 175, 104450. 10.1016/j.apsoil.2022.104450.

IPCC. 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 5. Waste. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html.

IPCC. 2019b. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html.

Márquez-Moreno, J., Rodriguez-López, C., Sánchez-Martín, Á. M., Pérez-Dalí, S., Campos Díaz de Mayorga, P., Merino, A., & de la Rosa Arranz, J. M. (2025). Evaluación de las propiedades agronómicas de residuos agro-ganaderos transformados y su posible uso como enmienda de suelo. Valorización de residuos agro-ganaderos y forestales para la salud del suelo y la economía circular: Libro de resúmenes de la I Jornada AGROVALOR: pág. 16 (2025).

Nieder, Rolf; Benbi, Dinesh K. (2024) Potentially toxic elements in the environment – a review of sources, sinks, pathways and mitigation measures.

Reviews on Environmental Health, 2024, v. 39, n. 3, p. 561, doi. 10.1515/reveh-2022-0161.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2018. Norma Técnica para el manejo sustentable de barros y biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales (Resolución 410/2018). https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/188053/20180716

Sheer, A., Sardar, M. F., Younas, F., Zhu, P., Noreen, S., Mehmood, T., ... & Guo, W. (2024). Bioresource Technology, 394, 130258. 10.1016/j.biortech.2023.130258