

Economía circular en la agricultura mediante la recuperación de fósforo

Circular economy in agriculture through phosphorus recovery

Adriana Carolina Quiceno Zuluaga¹

Angélica María Alzate Ibañez²

Luz Dary Ángel Torres³

Johan Manuel Redondo⁴

Recibido: 8 de abril del 2020 Aceptado: 4 de noviembre del 2020

DOI: <https://doi.org/10.29097/2011-639X.@a>

Resumen

El presente trabajo describe el estado conceptual y metodológico de la recuperación de fósforo desde la perspectiva de economía circular en la agricultura. A partir de la revisión de literatura en la Web of Science se construyó una red de citas —basada en la teoría de grafos— para el análisis de la información obtenida. Los hallazgos del estudio abordan los métodos de recuperación de fósforo y los resultados de la evaluación del desempeño de las diferentes tecnologías aplicadas. El documento establece el alto potencial al incluir fósforo en los procesos agrícolas, y el valor que genera en relación con la disminución de problemas ambientales, así como con la conservación de recursos.

Palabras clave: ciclo del fósforo, recuperación del fósforo, reciclaje del fósforo, ciclo de vida, ecotecnologías

Abstrac

This paper describes the conceptual and methodological framework of phosphorus recovery from the perspective of a circular economy in agriculture. From the literature review in the Web of Science, a citation network was built —based on graph theory— for the analysis of the information obtained. The findings of the study discuss the phosphorus recovery methods and the results of the performance of the different technologies. The study establishes the high potential of including phosphorus in agricultural processes, and the benefits it generates in reducing environmental problems, as well as conserving resources.

Keywords: phosphorus cycle, recovery phosphorus, recycled phosphorus, life-cycle, ecotechnologies

¹ Especialista en evaluación integral de estudios de impacto ambiental. Ingeniera ambiental. Docente investigadora invitada. Universidad Católica de Colombia.

² Doctora en ingeniería. Magíster en ingeniería. Magíster en administración. Especialista en control de calidad. Ingeniera química. Docente. Fundación Universidad de América.

³ Magíster en desarrollo sostenible y medioambiente. Ingeniera industrial. Docente Universidad Católica de Colombia.

⁴ Doctor en ingeniería automática. Magíster en gestión y evaluación ambiental. Magister en docencia e investigación universitaria. Ingeniero ambiental. Profesor investigador. Universidad Católica de Colombia.

Introducción

La economía circular se ha concebido como un paradigma que busca aumentar la eficiencia en el uso de los recursos (D'Amato et al., 2017; Toop et al., 2017), y lograr un equilibrio entre la economía, el medioambiente y la sociedad (Ghisellini et al., 2016). Este modelo ofrece herramientas para optimizar la cadena de suministro alimentario, mediante la transformación del uso de los recursos y la ecoeficiencia (D'Amato et al., 2017), lo cual permite a la agricultura posicionarse como elemento clave en el proceso de transición hacia un mundo sostenible (Rockström et al., 2017).

Algunos de los desafíos de la economía circular para la cadena de valor del sistema alimentario se asocian con la preocupación por el suministro de minerales, tales como el nitrógeno y fósforo (Lorick et al., 2020). Contradictoriamente, este último constituye un importante nutriente agrícola y un contaminante ambiental (Venkiteshwaran et al., 2018). El fósforo fundamenta el sostenimiento del suministro de alimentos, dado que la demanda de víveres es directamente proporcional al crecimiento poblacional, y genera un aumento sustancial en la utilización de este elemento como fertilizante en la agricultura (Cieślik y Konieczka, 2017).

Actualmente, el fósforo se obtiene principalmente en minas subterráneas; es un recurso insustituible, cuyas reservas se agotan rápidamente (Venkiteshwaran et al., 2018), situación que conlleva a un aumento en el interés por el reciclaje y recirculación del nutriente, dada la finitud del recurso mineral (van der Kooij et al., 2020). Este problema ha conducido a la búsqueda de alternativas viables para la recuperación y uso eficaz del fósforo, de forma tal que se mitiguen los impactos ambientales y se garantice la seguridad alimentaria (Barquet et al., 2020; Jurgilevich et al., 2016).

De acuerdo a lo anterior, surge el interrogante sobre el estado del conocimiento en relación a los métodos de recuperación de fósforo y los resultados obtenidos a través de la evaluación del desempeño de las diferentes tecnologías, y su potencial como estrategia de economía circular en la agricultura para el desarrollo de futuras investigaciones.

Método

La revisión descriptiva del estado conceptual y metodológico de la economía circular en la agricultura desde la perspectiva de la recuperación del fósforo se basa en la búsqueda y recuperación de información en la base de datos Web of Science, mediante la estrategia de búsqueda “circular economy” AND “agriculture” AND “phosphorus”. Los resultados obtenidos se analizaron descriptivamente, considerando el año de publicación, los autores más relevantes y las fuentes.

Posteriormente, se descargó el registro completo de las referencias y citas, con el objeto de analizarlas mediante un algoritmo basado en la teoría de grafos, con el que se elaboró la red de citas (Valencia-Hernández et al., 2020). Una vez obtenida esta red, se identificaron los documentos más influyentes (desde el grado de

entrada en la red), y se categorizó la información por grupos (mediante la modulación en clústeres de la red), para obtener un grafo dirigido. Finalmente, y con el fin de identificar tendencias y perspectivas en torno al tema de estudio, se seleccionaron los artículos que han sido publicados en los últimos cinco años (2016-2021) con el mayor índice de citación.

Resultados

Análisis descriptivo de los resultados de búsqueda en Web of Science

Los resultados de búsqueda en la base de datos Web of Science arrojaron un total de 52 documento para el análisis. La relación de registros por año muestra que las publicaciones en torno al tema objeto de estudio surgen en el año 2015, y se incrementan a partir del 2018 (Tabla 1), lo cual indica la intensificación de investigaciones en los últimos años sobre la temática abordada.

Tabla 1

Relación de documentos por año de publicación

Campo: años de publicación	Número de registros	% de 52
2021	6	11.538 %
2020	21	40.385 %
2019	10	19.231 %
2018	10	19.231 %
2017	2	3.846 %
2016	1	1.923 %
2015	2	3.846 %

Nota. Análisis bibliométrico de la Web of Science (WoS), abril 2021.

La Tabla 2 presenta las cinco revistas más importantes según el número de artículos publicados. Los índices bibliométricos de las revistas muestran la importancia temática del objeto de estudio. La revista “Environmental Evidence” de Reino Unido, categorizada en Q1 por el Scimago Journal Range (SJR) se posiciona como una de las revistas de mayor relevancia por proporcionar evidencia científica en temas para la gestión y política ambiental. Asimismo, la revista “Resources Conservation and Recycling” de Holanda, categorizada en Q1 por el SJR, se sitúa como una de las más importantes por su contribución en temas de gestión sostenible y conservación de los recursos.

Tabla 2

Revistas de mayor importancia en el tema de estudio

Campo: revista de origen	Cuartil SJR	% de 52
Environmental Evidence	Q1	9.615 %
Resources Conservation and Recycling	Q1	9.615 %
Journal of Cleaner Production	Q1	7.692 %
Agronomy	Q1	5.769 %
Sustainability	Q1	5.769 %

Nota. Análisis bibliométrico de la Web of Science (WoS), abril 2021.

En relación con los autores más relevantes en el tema, los resultados relacionados en la Tabla 3 incluyen a Macura, B., Haddaway, N.R. y Piniewski, M. del Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, como los investigadores con mayor número de publicaciones.

Tabla 3

Autores de mayor relevancia en el tema de estudio

Campo: autores	H-index	Número de registros	% de 52
Macura, B.	4	6	11.538 %
Haddaway, N. R.	23	4	7.692 %
Piniewski, M.	15	4	7.692 %
Gabarrell, X.	38	3	5.769 %
Petit-Boix, A.	14	3	5.769 %
Rufí-Salís, M.	4	3	5.769 %
Villalba, G.	23	3	5.769 %

Nota. Análisis bibliométrico de la Web of Science (WoS), abril 2021.

El análisis de la red de citas permite identificar las investigaciones que fundamentan la economía circular en la agricultura desde la perspectiva de recuperación y recirculación de fósforo. La Tabla 4 relaciona en primer lugar el trabajo de Cordell et al. (2009) sobre la historia del fósforo, las oportunidades de recuperación y reducción, y los desafíos que representa a nivel mundial. En segundo lugar, la investigación de Egle et al. (2016) aborda las técnicas de recuperación de fósforo de sistemas de tratamiento de aguas residuales. En tercer lugar, la publicación de Van Dijk, K. C. et al (2016) detalla la caracterización de los flujos de fósforo y eficiencias de uso.

Tabla 4

Autores seminales en el tema de estudio

1	Cordell, D. 2009, <i>Global Environ Chang</i> , V19, p. 292, DOI 10.1016/J.GLOENVCHA.2008.10.009
2	Egle, L. 2016, <i>Sci Total Environ</i> , V571, p. 522, DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2016.07.019
3	Van Dijk, K. C. 2016, <i>Sci Total Environ</i> , V542, p. 1078, DOI 10.1016/J.SCITOTENV.2015.08.048
4	Dawson, C. J. 2011, <i>Food Policy</i> , V36, p. S14, DOI 10.1016/J.FOODPOL.2010.11.012
5	Rittman, B. E. 2011, <i>Chemosphere</i> , V84, p. 846, DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.02.001
6	Cordell, D. 2011, <i>Chemosphere</i> , V84, p. 747, DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.02.032
7	Ciešlik, B. 2017, <i>J Clean Prod</i> , V142, p.1728, DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2016.11.116
8	Haddaway, N. R. 2019, <i>Environ Evid</i> , V8, p. 1-7, DOI 10.1186/S13750-018-0145-Z
9	Jones, D. L. 2013, <i>J Appl Ecol</i> , V50, p. 851, DOI 10.1111/1365-2664.12089

Nota. Análisis de red de citas por autor.

Enfoques de economía circular desde la perspectiva de recuperación de fósforo

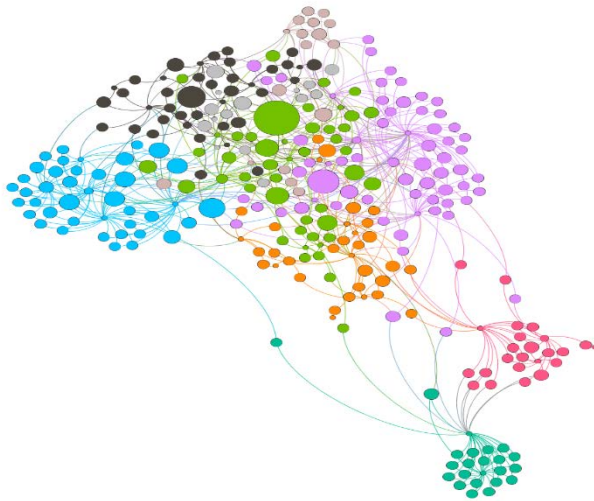
La categorización de los documentos mediante la aplicación del algoritmo basado en la teoría de grafos conlleva a un grafo dirigido con 304 nodos y 651 aristas (Figura 1), permitiendo identificar cinco enfoques de economía circular relativos a la recuperación de fósforo, tendencias de investigación, y perspectivas a nivel global.

Enfoque 1. Ecotecnologías para la recuperación de fósforo

Las ecotecnologías se han definido como las “intervenciones humanas en sistemas ecológicos en forma de prácticas o procesos biológicos, físicos y químicos diseñados para minimizar el daño al medioambiente y proporcionar servicios de valor para la sociedad” (Haddaway et al., 2019). Bajo este concepto, las estrategias de recirculación y recuperación de fósforo se han desarrollado con fuentes alternativas de desechos, tales como desperdicios agrícolas, lodos y aguas residuales (Macura et al., 2019a).

Figura 1

Red de citas obtenida con el algoritmo basado en la teoría de grafos



Nota. Algoritmo de grafo con 304 nodos y 651 aristas.

Las tecnologías mecánicas, biológicas y térmicas resultan aplicables a corrientes de lodo/estiércol para mejorar la recuperabilidad de fósforo (Venkiteshwaran et al., 2018). Lorick et al. (2020) mencionan que la combinación de los procesos de digestión anaeróbica y las tecnologías de recuperación de nutrientes en el digestor lograrían tanto la recuperación de su valor energético a través del biogás como de nutrientes minerales. A pesar de que el tratamiento convencional de aguas residuales se centra en la eliminación de nutrientes y carbono, un proceso de transición hacia la recuperación proporciona múltiples beneficios a la sociedad (Haddaway et al., 2019), y por ende, un aporte a la economía circular.

La precipitación de estruvita también se posiciona como una tecnología eficaz para la recuperación de nutrientes de procesos de digestión anaerobia, método útil en la transición hacia una economía circular (Lorick et al., 2020; Macura et al., 2019a).

Asimismo, la obtención de estruvita a través de corrientes de desechos de origen agrícola, municipal e industrial exhibe eficiencia de recuperación alta (Kataki et al., 2016).

Las metodologías utilizadas por los autores acudían a revisiones sistemáticas de literatura sobre las tecnologías de recuperación de nutrientes (Haddaway et al., 2019; Macura et al., 2019a), la efectividad de recuperación (Lorick et al., 2020; Macura et al., 2019b), y al análisis comparativo de estrategias de conversión y recuperación de fósforo (Venkiteshwaran et al., 2018).

Los resultados obtenidos por los autores sobre las ecotecnologías para la recuperación de fósforo permiten vislumbrar el aporte en la transición a una economía circular, de forma tal que se mejore el ciclo de vida de los nutrientes y se favorezca la seguridad alimentaria (Barquet et al., 2020; Jurgilevich et al., 2016; Nenov et al., 2020). Los autores resaltan la importancia de desarrollar estudios sobre la eficacia de las tecnologías, para cerrar el ciclo de nutrientes mediante el uso eficaz de los recursos (Lorick et al., 2020; Macura et al., 2019a).

Si bien se han dado desarrollos tecnológicos en la recuperación de minerales, aún existe incertidumbre frente a la efectividad de los procesos de recobro a base de ecotecnologías, tema que ha sido objeto de revisiones sistemáticas de la literatura (Haddaway et al., 2019; Lorick et al., 2020; Macura et al., 2019a; Macura et al., 2019b). A su vez, se observa una brecha literaria de estudios orientados a la evaluación de tecnologías potenciales para la conversión de minerales reutilizables, en cuanto a eficacia, viabilidad económica e impacto ambiental (Venkiteshwaran et al., 2018).

Enfoque 2. Análisis del ciclo de vida en relación con la recirculación de nutrientes

El análisis del ciclo de vida se ha presentado como principal insumo para identificar la viabilidad de nuevas tecnologías de extracción y recirculación de nutrientes (Gontard et al., 2018; Li et al., 2019; Rufí-Salís et al., 2020a; Rufí-Salís et al., 2021; Sherwood, 2020).

Algunos autores plantean beneficios referidos a la recirculación de residuos para obtener fertilizantes y generación de energía (Sherwood, 2020), productos químicos de alto valor (Gontard et al., 2018) o cristalización de estruvita (Li et al., 2019); también se plantea el fortalecimiento de la agricultura urbana hidropónica mediante la recuperación de fósforo, magnesio, potasio y calcio (Rufí-Salís et al., 2020a). En similitud, otros autores se enfocan en la disminución de impactos ambientales de la agricultura urbana por medio de la circularidad de elementos (Rufí-Salís et al., 2021).

Las metodologías utilizadas por los autores se basaron en el estudio de desempeño a través del análisis del ciclo de vida (Gontard et al., 2018; Rufí-Salís et al., 2020a; Rufí-Salís et al., 2021), revisión bibliográfica para identificar la técnica más óptima en la extracción de la estruvita (Li et al., 2019) y viabilidad, bondades y desafíos del

aprovechamiento de la biomasa en la generación de nuevos productos (Sherwood, 2020). Por último, se consolidó el mejoramiento del método ReCiPe por medio de la evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA) (Huijbregts et al., 2017).

Para algunos autores, los resultados más destacados se enmarcan por aplicación en campo como, por ejemplo, aquellos del estudio del ciclo de cultivo de tomate hidropónico realizado en azotea integrada en invernadero arrojaron que la recirculación directa de lixiviados (DLR) fue la opción más ecológica en relación con el calentamiento global frente a precipitación química (CP) y filtración por membrana (MF) (Rufí-Salís et al., 2020a). Se identificaron igualmente nuevas opciones tecnológicas para extender la digestión anaerobia, especialmente para mejorar la digestibilidad de lignocelulósicos y aumentar su ecoeficiencia (Gontard et al., 2018); también se recuperaron nutrientes y elementos en buena medida con fines agrícolas, aunque se establecieron necesidades de mejora (Li et al., 2019; Sherwood, 2020) y actualización de ReCiPe 2008 a versión ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017).

Enfoque 3. Viabilidad técnica y ambiental de la recuperación de fósforo

Aunque el análisis del ciclo de vida ha sido utilizado con el fin de validar el impacto en la recuperación de estruvita y su reutilización en los campos agrícolas para la producción urbana de alimentos (Rufí-Salís et al., 2020), otros métodos permiten de manera holística validar la viabilidad técnica y ambiental de las diferentes tecnologías en la recuperación de fósforo.

En los últimos años ha sido objeto de interés el potencial de las tecnologías para la recuperación y descontaminación del fósforo (Egle et al., 2016), así como el aprovechamiento de residuos provenientes de excretas y lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, para contribuir a una agricultura más sostenible (Huygens y Saveyn, 2018; van der Kooij et al., 2020).

En ese sentido, la recuperación de fósforo de aguas residuales municipales y materias primas secundarias se convierte en un proceso importante de la economía circular en el sector agrícola. Es una oportunidad para el reciclaje de nutrientes y una posibilidad para la obtención de fertilizantes de fósforo sintético (Egle et al., 2016; Huygens y Saveyn, 2018; van der Kooij et al., 2020). Un tratamiento fisicoquímico más en la recuperación de fósforo de aguas residuales maneja la precipitación de estruvita (Davis et al., 2016; Rufí-Salís et al., 2020; Yetilmezsoy et al., 2017).

Estas investigaciones parten de la combinación de diversas tecnologías, con el fin de obtener mayor eficiencia en la extracción (van der Kooij et al., 2020). Dentro de estas se cuenta el tratamiento de aguas residuales (Egle et al., 2016; Magrí et al., 2020; Rufí-Salís et al., 2020), el proceso de cristalización y reciclaje de estruvita (Yetilmezsoy et al., 2017), y la oxidación térmica (Huygens y Saveyn, 2018).

Por lo anterior, se resalta que la recuperación de fósforo se puede lograr a costos bajos; sin embargo, la tasa de recuperación es muy baja (Egle et al., 2016). Al respecto Yetilmezsoy et al. (2017) concluyen, con base en experimentos y análisis económicos,

que la recuperación de minerales en forma de estruvita resulta en un producto económicamente valioso y amigable con el ambiente. En consecuencia, los materiales recuperados constituyen una fuente importante de fertilizantes que proporcionan nutrientes significativos en las actividades agrícolas, mejoran el uso del suelo y contribuyen a prevenir la contaminación ambiental (Huygens y Saveyn, 2018). A su vez aportan eutrofización (Rufi-Salís et al., 2020), contribuyendo de manera relevante a una economía circular en la agricultura.

Enfoque 4. Recuperación en lodos y lixiviados de digestores anaerobios

Autores también se han referido a la recuperación de fósforo con el uso de lodos y lixiviados de digestores (Cieślik y Konieczka, 2017; Nenov et al., 2020), y del estiércol de animales (Nenov et al., 2020). Adicionalmente se mencionan las condiciones óptimas para la precipitación de estruvita y se abordan perspectivas de fuentes alternativas de recuperación de minerales (Kataki et al., 2016; Nenov et al., 2020); se encuentra también una revisión crítica de la implementación de estrategias en el manejo de fósforo difuso (Macintosh et al., 2018).

De acuerdo con lo anterior, la gestión integral de residuos sólidos generados por la incineración de lodos (Cieślik y Konieczka, 2017; Nenov et al., 2020), los procesos de recuperación de estruvita (Kataki et al., 2016), el tratamiento de aguas residuales (Barquet et al., 2020) y la recuperación de fósforo de fuentes difusas (Macintosh et al., 2018) conforman tecnologías innovadoras para la recuperación del fósforo.

Estas investigaciones se llevaron a cabo con la evaluación del valor fertilizante de la estruvita, en una variedad de cultivos (Kataki et al., 2016), con el análisis de tecnologías para la recuperación y reciclaje de fósforo (Nenov et al., 2020), y la revisión de la literatura y estudios de caso (Barquet et al., 2020; Macintosh et al., 2018).

Por lo anterior, se concluye que el fósforo es un elemento esencial y finito, y constituye la base para la seguridad alimentaria mundial (Barquet et al., 2020); en consecuencia, su recuperación es crucial para la producción sostenible de alimentos (Nenov et al., 2020). Cabe mencionar que las fuentes de magnesio soluble, libres de impurezas, mejoran la calidad de la estruvita y aumentan su aceptabilidad como fertilizante (Kataki et al., 2016). Las opciones de gestión de fósforo difuso más rentables e implementables son reducir y conservar su uso y mitigar su pérdida en la fuente (Macintosh et al., 2018). Finalmente, la falta de una política de dirección adecuada y un conocimiento insuficiente sobre las tecnologías para la reutilización aún obstaculizan cerrar el ciclo del fósforo (Barquet et al., 2020).

Enfoque 5. Nutrientes reciclados: un óptimo sustituto a los insumos químicos

La distribución desigual de alimentos en el mundo focaliza la escasez y genera desafíos con los recursos finitos necesarios para diferentes áreas como la agricultura (van Dijk et al., 2016; Vollaro et al., 2016). En este sentido, la economía circular resulta idónea para superar el actual modelo de producción y consumo basado en el

crecimiento continuo y aumento del rendimiento de los recursos (Ghisellini et al., 2016), potencializada por la extracción de nutrientes de diferentes fuentes, como las plantas de tratamiento de aguas residuales (Vollaro et al., 2016) y excretas (Akram et al., 2019).

Parte de la industria ha tomado medidas de reconversión de sobrantes, por ejemplo, la disminución de residuos para reutilización (Boh y Clark, 2020; Ghisellini et al., 2016), extracción del fósforo como insumo en fertilizantes y recirculación de este elemento para la seguridad alimentaria (van Dijk et al., 2016; Vollaro et al., 2016); también, el reciclaje de nutrientes esenciales, como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), extraídos de desechos orgánicos como excrementos humanos y animales en aplicación agrícola (Akram et al., 2019), y el mejoramiento de técnicas de aprovechamiento y la tecnificación en actividades agrícolas, para acrecentar las condiciones de estancia de nutrientes en el suelo (Mehr et al., 2018).

Estas investigaciones se han llevado a cabo con diferentes metodologías, tales como la revisión bibliográfica, para estudiar el modelado e implementación de la economía circular en diferentes niveles (micro, meso y macro) (Ghisellini et al., 2016) y el análisis de flujo de sustancias, para estudiar la dinámica del sistema del fósforo (Boh y Clark, 2020; van Dijk et al., 2016; Mehr et al., 2018). Algunos estudios se basaron en métodos prácticos como biorreactores de lecho móvil y los módulos de cristalización de estructuras, para extracción del fósforo de una PTAR (Vollaro et al., 2016), modelo de optimización sobre el peso, la distancia y los patrones espaciales de transporte, para identificar la viabilidad costo-beneficio en la producción de fertilizantes orgánicos (Akram et al., 2019).

Discusión de resultados

Dentro de la red de citas de las referencias analizadas (Figura 1) se obtuvieron cinco enfoques de la economía circular en agricultura basados en la recuperación de fósforo. Los documentos revisados permiten identificar el núcleo del objeto de estudio, la interpretación de los autores sobre economía circular con recuperación de fósforo, las metodologías manejadas en los diferentes estudios y los resultados más destacados.

Las materias tratadas en las investigaciones se categorizan como ecotecnologías empleadas para la recuperación de fósforo mediante fuentes alternativas, como aguas residuales y lodos de procesos de digestión anaerobia, aseguramiento del ciclo de vida mediante la recirculación de nutrientes y uso de biofertilizantes como sustitutos viables desde el concepto de economía circular, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5

Tendencias y determinantes encontrados por enfoque

Enfoque	Núcleo del estudio	Metodología(s) abordada(s)	Resultado(s) destacado(s)
Enfoque 1. Ecotecnologías para la recuperación de fósforo.	Las ecotecnologías para la recuperación de fósforo con fuentes alternativas y la reutilización del mineral como fertilizante en la agricultura son esenciales para la economía circular.	Revisiones sistemáticas de literatura, evaluación comparativa y análisis de datos de estudios sobre recuperación de nutrientes.	La recuperación de fósforo disminuye las preocupaciones sobre el agotamiento de las reservas del mineral y el aumento de la contaminación (Macura et al., 2019b; Venkiteshwaran et al., 2018). La precipitación de estruvita es una tecnología viable para el reciclaje de fósforo como fertilizante (Lorick et al., 2020).
Enfoque 2. Análisis del ciclo de vida en relación con la recirculación de nutrientes.	El análisis del ciclo de vida como herramienta fundamental para identificar la viabilidad de alternativas basadas en la recirculación de nutrientes.	Estudio de desempeño a través del análisis de ciclo de vida y revisión bibliográfica.	Para algunas aplicaciones, el análisis del ciclo de vida arroja resultados favorables contra el calentamiento global, pero en otras técnicas se establecieron necesidades de mejora, buscando mayor aprovechamiento (Gontard et al., 2018).
Enfoque 3. Viabilidad técnica y ambiental de la recuperación de fósforo.	La precipitación de estruvita para eliminar y recuperar el exceso de nitrógeno y fósforo, y la recuperación de aguas residuales.	Recuperación de nitrógeno mediante precipitación y cristalización de estruvita.	Recuperación de estruvita como una tecnología ecológica (Yetilmesoy et al., 2017).
Enfoque 4. Recuperación con lodos y lixiviados de digestores anaerobios.	La recuperación de fósforo de fuentes difusas.	Tratamiento de aguas residuales, lodos de depuradora, plantas comerciales de producción de estruvita.	El fósforo se puede reciclar, principalmente de las aguas residuales, estiércol y desechos orgánicos (Nenov et al., 2020).
Enfoque 5. Nutrientes reciclados, un óptimo sustituto de los insumos químicos.	Los nutrientes reciclados esenciales para la agricultura a través de elementos extraídos de plantas de tratamiento de aguas residuales y excretas.	Métodos prácticos como biorreactores de lecho móvil y revisión bibliográfica.	Se logra identificar la viabilidad de métodos de extracción de nutrientes como el P y N, aunque existen limitaciones en los costos de transporte y reconversiones estructurales (Akram et al., 2019).

Conclusiones

La recuperación y el reciclaje del fósforo se han convertido en una oportunidad económica, social y ambiental que promueve la economía circular en la agricultura. Alternativas tecnológicas como los lodos de las plantas, el tratamiento de aguas residuales, los procesos de digestión anaeróbica y la precipitación de estruvita conllevan ecotecnologías viables en la obtención de fertilizantes y mejoran el ciclo de vida de los nutrientes. Un insumo importante en la identificación de estas tecnologías es el análisis y evaluación del ciclo de vida, que permite reconocer los beneficios y oportunidades generados en busca de eficiencia.

No obstante, y a pesar de la viabilidad que presentan las alternativas para recuperación y recirculación de elementos importantes en la agricultura, existen desafíos en la transición de estos métodos, debidos a la interrupción del modelo de adquisición de fertilizantes químicos que prescinde de la labranza, lo cual implica un cambio en las actividades cotidianas de los involucrados y posibles sobrecostos relacionados con el transporte de las enmiendas.

La revisión de la literatura permite determinar líneas de investigación en torno al objeto de la recirculación y reciclaje de fósforo; al desarrollo de estudios que mejoren la eficiencia en los procesos de extracción del fósforo; a la evaluación de los mecanismos de recirculación y recuperación del mineral con fuentes alternativas, y a las estrategias asociadas con el aseguramiento y mejora del ciclo del fósforo.

Referencias

- Akram, U., Quttineh, N. H., Wennergren, U., Tonderski, K., y Metson, G. S. (2019). Optimizing nutrient recycling from excreta in Sweden and Pakistan: Higher spatial resolution makes transportation more attractive. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00050>
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., Leskinen, P., Matthies, B. D., y Toppinen, A. (2017). Green, circular, bioeconomy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168, 716-734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Barquet, K., Järnberg, L., Rosemarin, A., y Macura, B. (2020). Identifying barriers and opportunities for a circular phosphorus economy in the Baltic Sea region. *Water Research*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115433>
- Boh, M. Y., y Clark, O. G. (2020). Nitrogen and phosphorus flows in Ontario's food systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104639. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104639>
- Cieřlik, B., y Konieczka, P. (2017). A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The

- concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1728-1740. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.116>
- Davis, S. C., Kauneckis, D., Kruse, N. A., Miller, K. E., Zimmer, M., y Dabelko, G. D. (2016). Closing the loop: Integrative systems management of waste in food, energy, and water systems. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(1), 11-24. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0370-0>
- van Dijk, K. C., Lesschen, J. P., y Oenema, O. (2016). Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *Science of the Total Environment*, 542, 1078-1093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.048>
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., y Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522-542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019>
- Ghisellini, P., Cialani, C., y Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Gontard, N., Sonesson, U., Birkved, M., Majone, M., Bolzonella, D., Celli, A., Angellier-Coussy, H., Jang, G. W., Verniquet, A., Broeze, J., Schaer, B., Batista, A. P., y Sebok, A. (2018). A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(6), 614-654. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1471957>
- Haddaway, N. R., Piniewski, M., y Macura, B. (2019). What evidence exists relating to effectiveness of ecotechnologies in agriculture for the recovery and reuse of carbon and nutrients in the Baltic and boreo-temperate regions? *A systematic map protocol. Environmental Evidence*, 8(1), 1-7. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0150-x>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., y van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Huygens, D., y Saveyn, H. G. M. (2018). Agronomic efficiency of selected phosphorus fertilisers derived from secondary raw materials for European agriculture. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0527-1>

- Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., y Schösler, H. (2016). *Transition towards circular economy in the food system. Sustainability*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su8010069>
- Kataki, S., West, H., Clarke, M., y Baruah, D. C. (2016). Phosphorus recovery as struvite: Recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.009>
- van der Kooij, S., van Vliet, B. J. M., Stomph, T. J., Sutton, N. B., Anten, N. P. R., y Hoffland, E. (2020). Phosphorus recovered from human excreta: A socio-ecological-technical approach to phosphorus recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104744>
- Li, B., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, H. M., Munir, T., Wang, G. Q., y Young, B. R. (2019). Phosphorous recovery through struvite crystallization: Challenges for future design. *Science of the Total Environment*, 648, 1244-1256. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.166>
- Lorick, D., Macura, B., Ahlström, M., Grimvall, A., y Harder, R. (2020). Effectiveness of struvite precipitation and ammonia stripping for recovery of phosphorus and nitrogen from anaerobic digestate: A systematic review. *Environmental Evidence*, 9(1), 1-20. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00211-x>
- Macintosh, K. A., Mayer, B. K., McDowell, R. W., Powers, S. M., Baker, L. A., Boyer, T. H., y Rittmann, B. E. (2018). Managing diffuse phosphorus at the source versus at the sink. *Environmental Science and Technology*, 52(21), 11995-12009. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01143>
- Macura, B., Johannesdottir, S. L., Piniewski, M., Haddaway, N. R., y Kvarnström, E. (2019a). Effectiveness of ecotechnologies for recovery of nitrogen and phosphorus from anaerobic digestate and effectiveness of the recovery products as fertilisers: A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0173-3>
- Macura, B., Piniewski, M., Książniak, M., Osuch, P., Haddaway, N. R., Ek, F., Andersson, K., y Tattari, S. (2019b). Effectiveness of ecotechnologies in agriculture for the recovery and reuse of carbon and nutrients in the Baltic and boreo-temperate regions: A systematic map. *Environmental Evidence*, 8(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s13750-019-0183-1>
- Magrí, A., Carreras-Sempere, M., Biel, C., y Colprim, J. (2020). Recovery of phosphorus from waste water profiting from biological nitrogen treatment: Upstream, concomitant or downstream precipitation alternatives. *Agronomy*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy10071039>
- Mehr, J., Jedelhauser, M., y Binder, C. R. (2018). Transition of the Swiss phosphorus system towards a circular economy-part 1: Current state and historical developments. *Sustainability*, 10(5), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su10051479>

- Nenov, V., Peeva, G., Yemendzhiev, H., Stancheva, M., y Zerouq, F. (2020). Phosphorus consumption. From linear to circular flow. *Moroccan Journal of Chemistry*, 8(4), 819-829. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjc-hem-v8i4.20652>
- Rockström, J., Williams, J., Daily, G., Noble, A., Matthews, N., Gordon, L., Wetterstrand, H., DeClerck, F., Shah, M., Steduto, P., de Fraiture, C., Hatibu, N., Unver, O., Bird, J., Sibanda, L., y Smith, J. (2017). *Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability*. *Ambio*, 46(1), 4-17. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>
- Rufí-Salís, M., Brunnhofer, N., Petit-Boix, A., Gabarrell, X., Guisasola, A., y Villalba, G. (2020). Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions. *Science of the Total Environment*, 737, 139783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139783>
- Rufí-Salís, M., Calvo, M. J., Petit-Boix, A., Villalba, G., y Gabarrell, X. (2020a). Exploring nutrient recovery from hydroponics in urban agriculture: An environmental assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104683. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104683>
- Rufí-Salís, M., Petit-Boix, A., Villalba, G., Gabarrell, X., y Leipold, S. (2021). Combining LCA and circularity assessments in complex production systems: The case of urban agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105359. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105359>
- Sherwood, J. (2020). The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, 300, 122755. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122755>
- Toop, T. A., Ward, S., Oldfield, T., Hull, M., Kirby, M. E., y Theodorou, M. K. (2017). AgroCycle-Developing a circular economy in agriculture. *Energy Procedia*, 123, 76-80. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.269>
- Valencia-Hernández, D. S., Robledo, S., Pinilla, R., Duque-Méndez, N. D., y Olivartost, G. (2020). Sap algorithm for citation analysis: An improvement to tree of science. *Ingeniería e Investigación*, 40(1), 45-49. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n1.77718>
- Venkiteshwaran, K., McNamara, P. J., y Mayer, B. K. (2018). Meta-analysis of non-reactive phosphorus in water, wastewater, and sludge, and strategies to convert it for enhanced phosphorus removal and recovery. *Science of the Total Environment*, 644, 661-674. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.369>
- Vollaro, M., Galioto, F., y Viaggi, D. (2016). The circular economy and agriculture: New opportunities for re-using phosphorus as fertilizer. *Bio-Based and Applied Economics*, 5(3), 267-285. <https://doi.org/10.13128/BAE-18527>
- Yetilmezsoy, K., Ilhan, F., Kocak, E., y Akbin, H. M. (2017). Feasibility of struvite recovery process for fertilizer industry: A study of financial and economic

analysis. *Journal of Cleaner Production*, 152, 88-102.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.106>