

Propuesta de alternativas y criterios para la selección de estrategias para reducir pérdidas de
nitrógeno en agroecosistemas de páramo

Leydi Tatiana Garzón García, María Fernanda Rios Mercado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Daniela Cristina Rey Romero

Ingeniera Ambiental MSc.

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ingeniero Sanitario MSc., PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A nuestros padres, que siempre nos apoyaron y oraron por nosotras.

Agradecimientos

Gracias a Dios que nos unió para recorrer este camino juntas, a la profesora Daniela por su apoyo y dedicación, al profesor Ricardo por sus sabios consejos, a nuestros padres por sus oraciones y sus palabras de aliento, a Brahim e Iván por ayudarnos a mantener la motivación y la cordura y a todos esos amigos que siempre nos apoyaron y aconsejaron.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2. Marco de referencia	14
2.1 Impactos ambientales asociados a pérdidas de nitrógeno	14
2.2 Impactos ambientales asociados a pérdidas de nitrógeno	15
2.2.1 Sistemas integrados de producción agrícola	16
2.2.2 Manejo de nutrientes y/o del agua	17
2.2.3 Uso de enmiendas	18
3. Metodología	19
3.1 Fase 1: Identificación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas	19
3.1.1 Búsqueda de estudios primarios	19
3.1.2 Extracción y gestión de los datos	20
3.1.3 Síntesis y análisis de datos	21
3.2 Fase 2: Caracterización de criterios sociales, económicos y ambientales para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas	21
3.2.1 Búsqueda de estudios primarios	21
3.2.2 Extracción y gestión de los datos	21
3.2.3 Síntesis y análisis de datos	22

4. Resultados y discusión.....	22
4.1 Estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas	22
4.1.1 Panorama general de las investigaciones.....	22
4.1.2 Características ambientales y de suelo.....	23
4.1.3 Tipos de cultivo.....	24
4.1.4 Duración de los experimentos.....	24
4.1.5 Enfoque metodológico de los experimentos	25
4.1.6 Método de análisis estadístico	26
4.1.7 Estrategias de mitigación de pérdidas de nitrógeno.....	26
4.2 Criterios para la selección de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas	36
4.2.1 Criterio social.....	36
4.2.3 Criterio económico.....	38
4.2.3 Criterio ambiental	39
4.2.4 Criterio técnico.....	40
4.3.1 Estrategias	41
4.3.2 Criterios.....	42
5. Conclusiones	45
Referencias.....	46
Apéndices.....	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tasa de reducción de pérdida de nitrógeno de cada estrategia	27
Tabla 2. Criterios e indicadores para la selección de estrategias identificados en los estudios....	37
Tabla 3. Criterios e indicadores propuestos para agroecosistemas de páramo	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. El ciclo del nitrógeno en el suelo. Fuente: Adaptado de Mahmud et al. (2021)	15
Figura 2. Artículos filtrados por etapas.....	20
Figura 3. Artículos publicados por año en la última década (2012-2022) (n=26).....	22
Figura 4. Distribución de artículos publicados por cada país (n=26)	23
Figura 5. Duración de los experimentos de los estudios evaluados (n=23).....	25

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Ecuaciones de búsqueda de estudios primarios sobre estrategias para reducción de pérdidas de nitrógeno	55
Apéndice B. Mapa de información a extraer en las publicaciones	55
Apéndice C. Información general de las publicaciones seleccionadas	56
Apéndice D. Gráfica de frecuencia de implementación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en los artículos seleccionados	80

Resumen

Título: Propuesta de alternativas y criterios para la selección de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo*.

Autor: Leydi Tatiana Garzón García, María Fernanda Rios Mercado**

Palabras Clave: pérdidas de nitrógeno, agroecosistemas de páramo, selección de estrategias, criterios.

Descripción: En la agricultura es común el uso de fertilizantes nitrogenados para suplir las necesidades nutricionales de los cultivos. Sin embargo, las prácticas inadecuadas de fertilización causan pérdidas de nitrógeno como la lixiviación y escorrentía que contaminan fuentes de aguas superficiales y subterráneas y generan pérdidas económicas para los agricultores. Los páramos ofrecen importantes servicios ecosistémicos relacionados con los recursos hídricos, por lo que se hace necesario implementar prácticas de manejo del nitrógeno que armonicen las actividades agrícolas con la conservación de estos ecosistemas. En este estudio, se proponen alternativas y criterios para la selección de estrategias que permitan reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo a partir de una revisión de literatura. Se identificaron 10 estrategias relacionadas con sistemas integrados de producción, manejo de los nutrientes y/o del agua y uso de enmiendas. El 90% de las estrategias identificadas en diferentes contextos geográficos resultaron ser eficaces en la reducción de pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas sin afectar el rendimiento de los cultivos. Respecto a los criterios empleados para seleccionar dichas estrategias, se halló que los estudios principalmente han considerado aspectos ambientales y económicos. En un agroecosistema de páramo se propone considerar estrategias como el uso de abonos orgánicos obtenidos mediante biotecnologías como el compostaje, el uso de enmiendas como el biocarbón o la zeolita y la mejora en el riego, en términos de ajustar la aplicación del agua a las necesidades hídricas de los cultivos. Para la selección de las estrategias en agroecosistemas de páramo se deberían considerar criterios ambientales, relacionados con la reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados; criterios sociales, que consideren la percepción de los agricultores sobre los beneficios de la estrategia; criterios económicos, que tengan en cuenta los costos totales de su implementación y además el aspecto técnico que evalúa el rendimiento del cultivo.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Daniela Cristina Rey Romero, Ingeniera Ambiental MSc. Codirector: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Ingeniero Sanitario MSc., PhD

Abstract

Title: Proposal of alternatives and criteria for the selection of strategies to reduce nitrogen losses in páramo agroecosystems*.

Author(s): Leydi Tatiana Garzón García, María Fernanda Rios Mercado**

Key Words: nitrogen losses; páramo agroecosystems; selection of strategies; criteria.

Description: In agriculture, the use of nitrogen fertilizers is common to supply the nutritional needs of crops. However, inadequate fertilization practices cause nitrogen losses such as leaching and runoff that contaminate surface and groundwater sources and generate economic losses for farmers. The páramos offer important ecosystem services related to water resources, so it is necessary to implement nitrogen management practices that harmonize agricultural activities with the conservation of these ecosystems. This study proposes alternatives and criteria for the selection of strategies to reduce nitrogen losses in páramo agroecosystems based on a literature review. 10 strategies related to integrated production systems, nutrient and/or water management, and use of amendments were identified. 90% of the strategies identified in different geographical contexts were found to be effective in reducing nitrogen losses in agroecosystems without affecting crop yields. Regarding the criteria used to select these strategies, it was found that the studies have mainly considered environmental and economic aspects. In a páramo agroecosystem, it is proposed to consider strategies such as the use of organic fertilizers obtained through biotechnologies such as composting, the use of amendments such as biochar or zeolite, and improved irrigation, in terms of adjusting water application to the water needs of crops. For the selection of strategies in páramo agroecosystems, environmental criteria should be considered, related to the reduction of nitrogen losses in cultivated soils; social criteria, which consider the farmers' perception of the benefits of the strategy; economic criteria, which consider the total costs of its implementation; and the technical aspect that evaluates crop yield.

*Degree Project

** Physicomechanical Engineering's Faculty. Civil Engineering School. Director: Daniela Cristina Rey Romero, Environmental Engineer MSc. Co director: Edgar Ricardo Oviedo Ocaña, Sanitary Engineer MSc., PhD.

Introducción

El nitrógeno es un elemento indispensable para el adecuado desarrollo y crecimiento de los cultivos (Mayz-Figueroa, 2004), por lo tanto, en la agricultura es común el uso de fertilizantes nitrogenados para suplir este requerimiento nutricional. Sin embargo, las prácticas inadecuadas de fertilización causan baja eficiencia de uso y pérdidas de nitrógeno, de tal forma que se genera un impacto ambiental negativo y pérdidas económicas para los agricultores (Stuart et al., 2014). Estas prácticas agrícolas inadecuadas incluyen el uso de dosis elevadas de fertilizantes (orgánicos y/o sintéticos), lo cual genera una mayor disponibilidad de nitrógeno para los cultivos, pero en muchos casos estas cantidades superan los requerimientos nutricionales de las plantas y los excesos generan contaminación de fuentes hídricas por medio de lixiviación y/o escorrentía del nitrógeno (Zhao et al., 2015), acidifican el suelo, generan emisiones de gases de efecto invernadero, favorecen la eutrofización y el bajo rendimiento de los cultivos (Portocarrero et al., 2016).

Los páramos son ecosistemas de alta montaña caracterizados por ofrecer diversos servicios ecosistémicos, relacionados principalmente con su biodiversidad y fuentes hídricas de especial importancia para riego de cultivos y consumo humano (Solanilla et al., n.d.). El ser humano los ha intervenido con prácticas agrícolas intensivas que tienen el potencial de generar afectaciones a la calidad del agua por altas concentraciones de nitrógeno de origen agrícola (Rey-Romero et al., 2022; Rincón, 2015). Debido a su importancia, se evidencia la necesidad de implementar prácticas agrícolas sostenibles en este tipo de ecosistemas, considerando criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos (Giuliano et al., 2016; Sharma & Bali, 2017).

Algunas estrategias para el manejo sostenible del nitrógeno han sido estudiadas por diversos autores (Sharma & Bali, 2017). No obstante, se tiene incertidumbre acerca de cuáles se

pueden implementar en agroecosistemas de páramo. La selección de estas estrategias debe considerar diferentes criterios para garantizar que sean apropiadas para este tipo de ecosistema, considerando los intereses de los agricultores y el bienestar del medio ambiente (Solanilla et al., n.d.). Por lo tanto, es importante caracterizar criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos, para determinar qué aspectos deberían tenerse en cuenta en la implementación de mejores prácticas agrícolas sostenibles que ayuden a reducir pérdidas de nitrógeno en un contexto particular (Giuliano et al., 2016; Solanilla et al., n.d.; Vázquez-Vázquez et al., 2011).

Este estudio tiene como objetivo proponer alternativas y criterios para la selección de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo, para tal propósito se busca identificar estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas y caracterizar criterios sociales, ambientales, económicos y técnicos que permitan su selección en un contexto particular. Este trabajo de grado se encuentra enmarcado en el proyecto de investigación titulado “Estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en cultivos de cebolla junca que promuevan la resiliencia de pequeños agricultores del Páramo de Berlín, frente a los retos económicos derivados de la pandemia” desarrollado por el Grupo de Investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la UIS.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer alternativas y criterios para la selección de estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo.

1.2 Objetivos Específicos

- 1.2.1 Identificar estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno que hayan sido implementadas en agroecosistemas.
- 1.2.2 Caracterizar criterios sociales, económicos, ambientales y técnicos que permitan la selección de estrategias para la reducción de pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo.

2. Marco de referencia

2.1 Impactos ambientales asociados a pérdidas de nitrógeno

La disponibilidad de nitrógeno en la atmósfera es bastante amplia, a pesar de ello, las plantas solo pueden absorber nitrógeno en forma de iones de nitrato y amonio. Estos compuestos se encuentran de forma natural en el suelo gracias a organismos procariontes que fijan nitrógeno gaseoso y por medio de una relación simbiótica lo hacen disponible para la planta; otras formas de encontrar nitrógeno en el suelo provienen de residuos vegetales, animales y/o de origen antrópico y fertilizantes nitrogenados (Cárdenas et al., 2004).

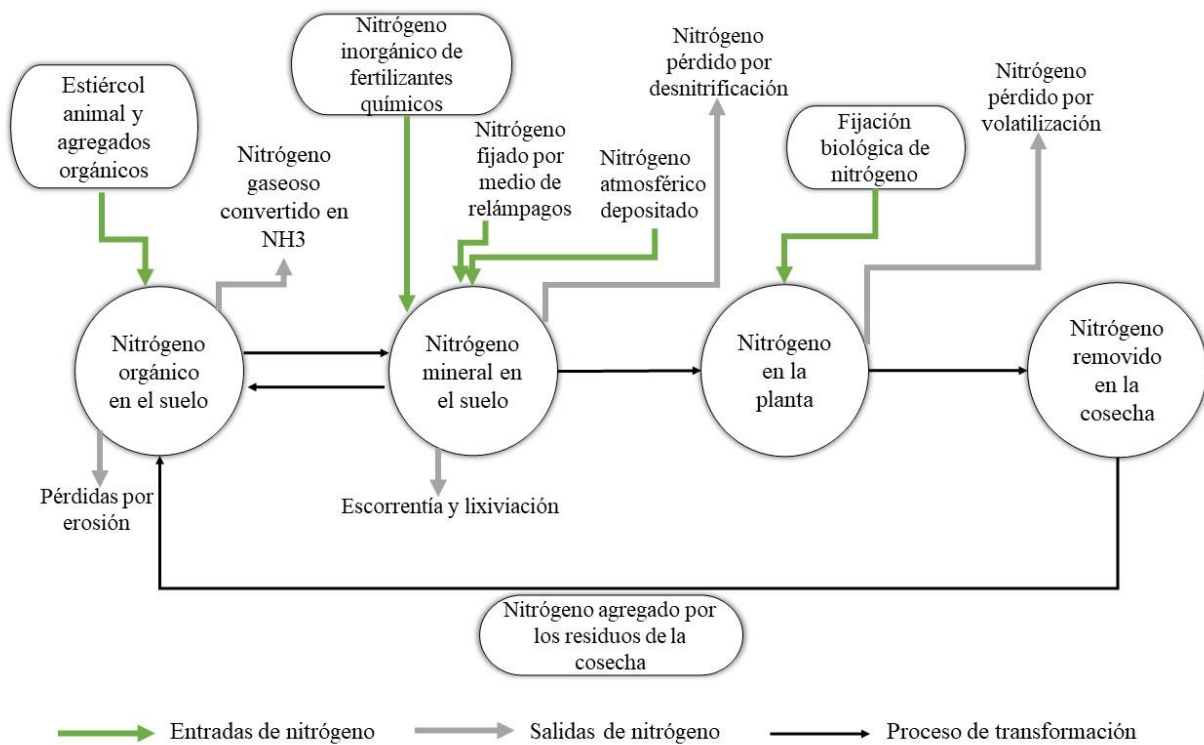
El ciclo del nitrógeno en el suelo, según las interacciones con la planta se puede resumir en tres (3) etapas principales: adquisición, fijación y desecho, como se observa en la Figura 1. La adquisición se puede dar con diversas fuentes (microorganismos, residuos, fertilizantes, entre otros), permitiendo el paso a procesos biológicos por medio de los cuales se fija al suelo en diferentes compuestos (Mayz-Figueroa, 2004). La mineralización es el proceso por medio del cual el nitrógeno se fija al suelo descomponiéndose en materia orgánica y llegando a formar amonio, compuesto que adquieren las plantas para su desarrollo (Verhulst et al., 2015). Y finalmente se da la nitrificación que es la transformación de iones amonio a nitrito y nitrato, precediendo la desnitrificación que es la descomposición en óxidos gaseosos que favorecen el efecto invernadero (Daza, 2018).

En un agroecosistema el balance de nitrógeno se define considerando las entradas y salidas de este, teniendo en cuenta que las entradas principales son el nitrógeno fijado y el proveniente de fertilizantes. Las salidas o formas de pérdida de nitrógeno más representativas son la lixiviación, que se presenta cuando el nitrógeno en la solución del suelo se mueve por gravedad hacia capas

de suelo donde ya no es aprovechable para la planta; la escorrentía, es el proceso físico del flujo superficial de agua hasta una red de drenaje llevando consigo las soluciones disponibles (no fijadas), como podrían ser soluciones nitrogenadas; la volatilización, mediante la cual el amonio en el suelo pasa al aire en forma de amoniaco gaseoso y la desnitrificación (Alvarez, 2006).

Figura 1.

El ciclo del nitrógeno en el suelo. Fuente: Adaptado de Mahmud et al. (2021)



2.2 Impactos ambientales asociados a pérdidas de nitrógeno

La pérdida de nitrógeno en el suelo es un fenómeno que sucede en cualquier tipo de ecosistema, debido a esto, a lo largo de los años ha aumentado la preocupación por generar estrategias para que estas pérdidas no sean tan significativas o nocivas con el medio ambiente (Alvarez, 2006). Para cada tipo de ecosistema se deben implementar estrategias diferentes para el manejo y tratamiento del nitrógeno, las cuáles se adapten a las condiciones ambientales,

económicas y sociales, de tal forma que sean aplicables en un contexto específico, como explican Mahmud et al. (2021) en su revisión sobre posibles estrategias de mitigación de pérdidas de nitrógeno. Estos autores identificaron diferentes enfoques para las estrategias, correspondientes a: sistemas integrados de producción agrícola, manejo de nutrientes y/o del agua, uso de agricultura de precisión, manejo de pastos y ganado, manejo de las aguas residuales del ganado, uso de enmiendas, biotecnología aplicada a cultivos de cereales para la fijación del nitrógeno, uso de comunidades microbianas promotoras del crecimiento vegetal, enfoque fitogénico y utilización de los hongos, agricultura orgánica, zanjas de drenaje ecológicas, y mejoramiento genético de cultivos. De estos enfoques, en esta investigación se consideraron aquellos que podrían ser potencialmente aplicados por pequeños agricultores en contextos agrícolas de páramo, los cuales se describen a continuación.

2.2.1 Sistemas integrados de producción agrícola

Esta estrategia persigue la integración de los recursos disponibles en una unidad de producción, de tal forma que se complementen entre sí con el propósito de disminuir la dependencia de insumos externos. El uso de todos los componentes permite maximizar el aprovechamiento de nutrientes y ayuda a aliviar las pérdidas de nitrógeno (Li et al., 2020). Los sistemas integrados de producción agrícola no son sistemas restringidos, sino un enfoque sinérgico donde se utilizan los recursos de forma cíclica con un mínimo de uso de insumos externos, contrario a los sistemas intensivos (Mahmud et al., 2021). Por ejemplo, una finca que tiene cultivos de cebolla y a su vez cría de pollos puede usar el estiércol de los pollos como sustrato para realizar un producto compostado que funcione como fertilizante orgánico para el cultivo de cebolla, de esta forma se puede incrementar la disponibilidad de nutrientes en el suelo de cultivo y con un

adecuado manejo de este tipo de fertilización, reducir la pérdida de nitrógeno por escorrentía o lixiviación (Li et al., 2020).

Al ser una práctica sostenible y versátil resulta muy útil en cualquier tipo de ecosistema, incluso en agroecosistemas de páramo. Además, debido a que usa un mínimo de recursos externos pueden ayudar a reducir costos de implementación, beneficiando así a los agricultores (Zimmer et al., 1999).

2.2.2 Manejo de nutrientes y/o del agua.

El manejo de los nutrientes incluye actividades como combinación de diferentes tipos de fertilizantes para reducir pérdidas en un cultivo, ya sea fertilizantes sintéticos u orgánicos. Cuando se garantiza una nutrición equilibrada en suelos de cultivo a partir del uso de fertilizantes orgánicos y sintéticos es posible producir cultivos de forma sostenible, donde se disminuye la pérdida de nitrógeno a través de lixiviación, escorrentía, volatilización, entre otras vías de pérdida y, además puede mejorar el rendimiento de los cultivos (Cao et al., 2017; Husain et al., 2019; Xue et al., 2014).

En contraste a las prácticas convencionales de fertilización, la combinación de fertilizantes orgánicos con fertilizantes sintéticos y en dosis óptimas puede reducir de forma significativa las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía (Cao et al., 2017; Husain et al., 2019). No obstante, es importante tener control del nitrógeno que se aplica en los cultivos a partir de la fertilización, sobre todo cuando se usan fertilizantes orgánicos, debido a que la aplicación excesiva genera pérdidas de nutrientes, por tanto, es indispensable evaluar el balance del nitrógeno en el suelo y así aumentar los beneficios de esta estrategia para reducir impactos ambientales sin afectar el rendimiento de los cultivos (Xue et al., 2014).

El riego en los cultivos y los eventos de lluvia guardan una estrecha relación con las pérdidas de nitrógeno por lixiviación, ya que durante estos eventos se presentan picos de lixiviación de nitratos (Tapia Vargas et al., 2012). El manejo del riego puede disminuir pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía (Yu et al., 2022). Este tipo de estrategias es muy importante en agroecosistemas de páramo, sobre todo en relación con los recursos hídricos, ya que su objetivo es la mejora de las prácticas convencionales en el uso de fertilizantes y del agua, de tal forma que se obtenga el mayor rendimiento con el mínimo de afectaciones ambientales.

2.2.3 *Uso de enmiendas*

Una enmienda es toda aquella sustancia capaz de mejorar por lo menos una característica física, química o biológica del suelo (ICONTEC, 2019). Las enmiendas pueden ser orgánicas o minerales y, dependiendo de su naturaleza, pueden mejorar diferentes propiedades del suelo. Algunas de las mejoras pueden ser mayor retención del agua y/o de los nutrientes en el suelo, como el caso del biocarbón (Haider et al., 2017); la neutralización de algunos elementos tóxicos como aluminio, hierro, manganeso o metales pesados; o la proporción de minerales adicionales y el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, como en el caso de la zeolita (Jha & Hayashi, 2009).

Autores como Ahmed et al. (2019), Haider et al. (2017) y Taheri-Soudejani et al. (2019) se han dedicado a estudiar enmiendas que disminuyen el riesgo de contaminación de las aguas por actividades agrícolas, y han comprobado que estas resultan útiles para disminuir la carga de nitrógeno en aguas superficiales y subterráneas. Por ello, el uso de enmiendas en agroecosistemas de páramo puede ser una estrategia que permita reducir efectos nocivos debido a la implementación convencional de fertilizantes.

3. Metodología

3.1 Fase 1: Identificación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas

3.1.1 Búsqueda de estudios primarios

La búsqueda de estudios primarios se realizó en cuatro diferentes bases de datos (Scopus, Web of Science, Redalyc y Scielo) y se enfocó en artículos científicos en idioma inglés y español, publicados en la última década (2012-2022) para reducir el número de artículos de la revisión, además de que se observó que los estudios de años previos contenían información que ya se encuentra actualizada. Para cada una de las tres categorías establecidas se plantearon diferentes ecuaciones de búsqueda como se presenta en el Apéndice A.

De la búsqueda avanzada, se obtuvieron un total de 559 artículos excluyendo algunos que se repetían entre estructuras de búsqueda y categorías. Estos se organizaron en una tabla de Microsoft Excel para someterlos a diferentes filtros y se descartaron los que no eran útiles para esta investigación. Los diferentes filtros se describen a continuación.

3.1.1.1 Filtro por título. se excluyeron artículos cuyos títulos contuvieran términos relacionados con modelos, uso de software, sistemas de información geográfica y/o algún tipo de simulación. Se incluyeron artículos cuyo título estuviera relacionado con alguno de los tipos de estrategias de reducción de pérdidas de nitrógeno consideradas en esta investigación.

3.1.1.2 Filtro por resumen. Los artículos debían especificar que se evaluó alguna estrategia relacionada con las categorías definidas para este estudio. Las formas de pérdidas de nitrógeno consideradas son principalmente por lixiviación y escorrentía debido a que estas son

las que más afectan a fuentes hídricas superficiales y subterráneas (Husain et al., 2019). Además, se debía identificar que el estudio fue realizado para cultivos agrícolas.

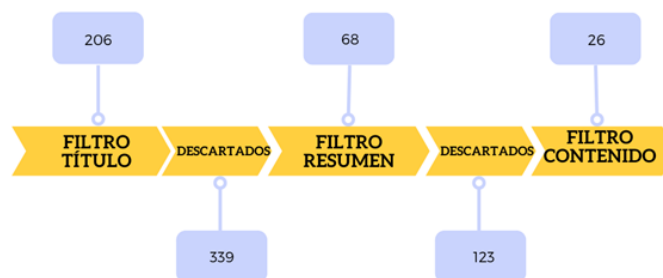
3.1.1.3 Filtro por contenido. El artículo debía explicar de forma clara y detallada la metodología aplicada, haber usado un control y presentar datos de cuantificación de pérdidas de nitrógeno. Además, se descartaron estudios realizados en laboratorios e invernaderos.

3.1.2 Extracción y gestión de los datos

La búsqueda de artículos se organizó por medio de un mapa conceptual que sintetiza los objetivos, alcances y tipo de información requerida, el cual se desarrolló por medio del programa Xmind y se encuentra en el Apéndice B. A partir de los filtros considerados, se obtuvieron 26 artículos de los cuáles se extrajo la información (Figura 2). Los 26 artículos seleccionados se adicionaron al programa Mendeley para procesar y manejar su información, además se creó una base de datos en Microsoft Excel donde se registró la siguiente información: i) título de la publicación, ii) año, iii) revista, iv) autor(es), v) lugar de estudio, vi) características ambientales y del suelo, vii) condición agrícola, viii) estrategia empleada, ix) categoría, x) diseño experimental, xi) cultivo evaluado, xii) fertilizante empleado, xiii) duración del estudio, xiv) método estadístico usado. En el Apéndice C se encuentran los datos extraídos a partir de la revisión.

Figura 2.

Artículos filtrados por etapas



3.1.3 Síntesis y análisis de datos

Se realizó una recopilación de información según las categorías establecidas y se identificaron las estrategias empleadas, las metodologías y las conclusiones suministradas por los artículos seleccionados.

3.2 Fase 2: Caracterización de criterios sociales, económicos y ambientales para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas

3.2.1 Búsqueda de estudios primarios

Se realizó una revisión bibliográfica de artículos relacionados con la caracterización de criterios ambientales, sociales, técnicos y económicos para la selección de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en diferentes contextos agrícolas. Los artículos seleccionados abordaban casos de estudio sobre evaluación de estrategias para mitigar la contaminación del agua y del suelo por nitrógeno y fueron preseleccionados a partir de una revisión de literatura del proyecto macro en que se encuentra enmarcado este trabajo de grado. A su vez, se incluyeron estudios similares hallados por las autoras, siguiendo un protocolo de búsqueda que partió desde las referencias de los artículos previamente seleccionados. Para la inclusión de estos referentes clave, se revisó que consideraran y caracterizaran criterios para la evaluación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno. Se hallaron en total 10 artículos publicados entre 2006 y 2022.

3.2.2 Extracción y gestión de los datos

Los 10 artículos seleccionados se ingresaron en el programa Mendeley para procesar y manejar su información, además se creó una tabla en Microsoft Excel y se extrajo la siguiente información: i) criterios, ii) indicadores, iii) forma de medición, iv) datos para realizar la medición y v) referencias.

3.2.3 Síntesis y análisis de datos

Se recopiló la información hallada acerca de la caracterización de los criterios considerados en los estudios, y se realizó la propuesta para el contexto de agroecosistema de páramo, teniendo en cuenta el Código Internacional de Conducta para el Uso y Gestión Sostenible de los Fertilizantes (FAO, 2019).

4. Resultados y discusión

4.1 Estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas

4.1.1 Panorama general de las investigaciones

El estudio de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas ha ido variando durante la última década (2012-2022), con un promedio de 2 artículos publicados por año (Figura 3).

Figura 3.

Artículos publicados por año en la última década (2012-2022) (n=26)

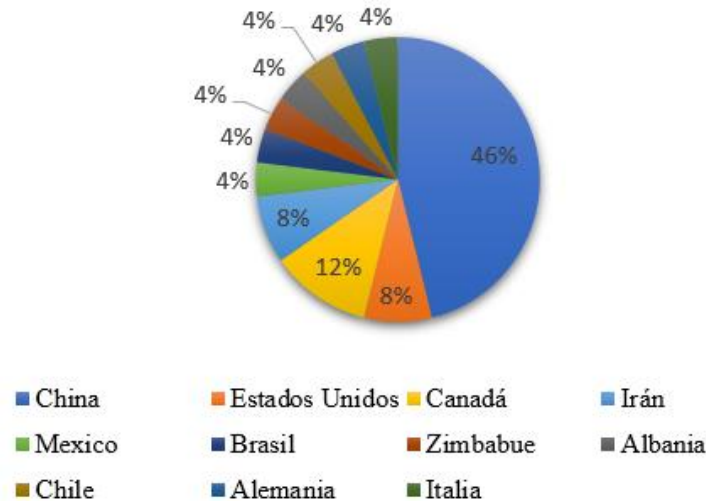


Actualmente, China es el país con el mayor número de publicaciones relacionadas con este tema, con un 46% de las publicaciones de acuerdo con la Figura 4, seguido de Canadá con un 12% y Estados Unidos e Irán con un 8% de las publicaciones. Los demás países cuentan con tan solo el

4% que equivale a solo un artículo, donde se destacan Brasil, Chile y México por ser países latinoamericanos.

Figura 4.

Distribución de artículos publicados por cada país (n=26)



El 54% de las publicaciones estudiadas evalúa pérdidas de nitrógeno solo por lixiviación, el 8% analiza pérdidas solo por escorrentía, sin embargo, el 12% evalúa otras formas de pérdida como la volatilización, además de la lixiviación y escorrentía. También hay un 19% de los artículos que evaluaron lixiviación y volatilización, y tan solo el 8% de los artículos midieron conjuntamente lixiviación y escorrentía.

4.1.2 Características ambientales y de suelo

En las investigaciones, el clima monzónico subtropical fue el más encontrado debido a la cantidad de estudios situados en China; región asiática con temperaturas promedio anuales de 18°C (Ferreira et al., n.d.). La precipitación anual promedio se concentra en el intervalo de 400-800 milímetros en los artículos revisados. Estos se centraron en registrar las pérdidas de nitrógeno a lo

largo del desarrollo del cultivo sin considerar el efecto de eventos y/o temporadas/épocas de lluvia donde aumenta la cantidad de agua superficial contribuyendo a la lixiviación y/o escorrentía de nitrógeno (Zhao et al., 2015).

En los artículos revisados se trabajó en su mayoría en suelos con textura franco arcillosa o franco limosa, donde se registraron sus propiedades más relevantes como conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, coeficiente de permeabilidad, pH y contenido de materia orgánica, con el fin de determinar relaciones entre el tipo de suelo y la pérdida de nitrógeno (Aghaalikhani et al., 2012).

4.1.3 Tipos de cultivo

Los cultivos evaluados con mayor frecuencia en los artículos fueron arroz (21%), maíz (12%), trigo (9%) y canola (9%). Otros cultivos identificados, como aguacate, tomate, cebada, hortalizas, guisantes, papa, algodón, frambuesa, tapones de fresa, espinaca, soja y sorgo se evaluaron cada uno en un solo estudio. El cultivo de arroz requiere un manejo cuidadoso debido a las grandes cantidades de agua que emplea y a la potencial contaminación que generan los diversos fertilizantes y pesticidas que se aplican en una cosecha (Li et al., 2020). Por lo dicho anteriormente, se encuentra una diversidad de estudios en torno al manejo del agua y/o nutrientes enfocados en cultivos de arroz.

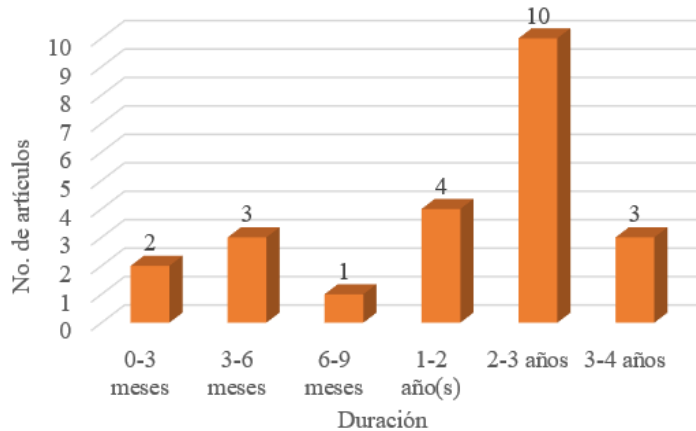
4.1.4 Duración de los experimentos

La duración de los experimentos varía desde los 3 meses hasta los 4 años como se observa en la Figura 5. Se concluyó que aquellos estudios cuya duración fue superior a un año, consideraban más de un ciclo de cultivo con estrategias diferentes. Para estudios cuya duración fue menor, se aplicó la división por parcelas del área de trabajo para así aplicar una estrategia

diferente en cada una durante el ciclo del cultivo y obtener datos suficientes para concluir sobre la eficiencia de estas.

Figura 5.

Duración de los experimentos de los estudios evaluados (n=23)



4.1.5 Enfoque metodológico de los experimentos

Se definieron tres tipos de estudio de acuerdo con los enfoques utilizados: i) parcelas experimentales, ii) lisímetros y iii) macetas. Los estudios realizados en parcelas experimentales se caracterizan por tener divisiones definidas en áreas equitativas para cada una, se presenta la toma de datos por medio de ductos que recogen el agua para cuantificar la cantidad de lixiviados (Yang et al., 2015). En otros casos, se toma una muestra de solución de suelo para analizar el contenido de nitrógeno, ya sea cerca a los árboles como en el caso del aguacate (Tapia Vargas et al., 2012) o en el campo de cultivo en caso de hortalizas (Ahmed et al., 2019), algodón (Tian et al., 2018), entre otros.

En el caso de lisímetros, se colocan ductos en las parcelas de cultivo que pueden estar enterradas en el suelo o sobre este; su función es extraer el agua para su posterior análisis, donde se mide el nitrógeno lixiviado (Zhao et al., 2015). Los que aplicaron este enfoque metodológico

fueron principalmente en cultivos de arroz, que se desarrollan en zonas inundadas y los ductos se comportan de forma eficiente.

Para el caso de las macetas, se evaluaron cultivos de maíz, tapones de fresa y trigo. Se aplicaron únicamente en estudios donde se evaluó el uso de enmiendas en conjunto con fertilizantes de tipo orgánico o sintético para estimar la pérdida de nitrógeno (Harindintwali et al., 2021). Por ejemplo, el cultivo de tapones de fresa consistía en evaluar el desarrollo de la planta usando vermicompost como enmienda, desde su siembra hasta tener el primer tapón de aspecto verdoso con forma redonda el cual se desarrolla y crece hasta llegar a tamaño y color de una fresa (Broz et al., 2017).

4.1.6 Método de análisis estadístico

La técnica de análisis de varianza (ANOVA) permite la comparación de múltiples medidas por medio de sus varianzas dando así mayor confiabilidad y considerándose uno de los métodos de mayor uso para el análisis de datos en estudios primarios (*ANOVA Análisis de Varianza Para Comparar Múltiples Medias*, n.d.). Los artículos encontrados implementaron esta metodología para el análisis de datos por medio de los softwares que lo aplican, algunos de los más empleados fueron SPSS en su versión 2.0, 18.0; SAS y ASSISTAT 7.7.

4.1.7 Estrategias de mitigación de pérdidas de nitrógeno

La mayoría de los artículos estudiados presentan estrategias de mitigación de pérdidas de nitrógeno relacionadas con el uso de enmiendas, los cuales fueron 17 de 26 artículos. Los artículos que se clasifican en manejo de nutrientes y/o del agua son ocho (8) y se halló que solo uno (1) de los artículos seleccionados evaluó sistemas integrados de producción agrícola. En el Apéndice D se encuentra una gráfica que indica la frecuencia de las estrategias empleadas para la reducción de

pérdidas de nitrógeno en los diferentes estudios. En la Tabla 1 se indican las tasas de reducción de pérdidas de nitrógeno de las estrategias identificadas.

Tabla 1.

Tasa de reducción de pérdida de nitrógeno de cada estrategia

Estrategia	Tasa de reducción de pérdida*			Referencias
	Lixiviación y escorrentía	Lixiviación	Escorrentía	
Cocultivo con patos	82%			[16]
Combinación fertilizantes orgánico y sintético	47%	22%-42%	64%	[3], [18]-[20]
Riego por microaspersión		51%		[21]
Riego por goteo		68%		[22]
Fertilización de liberación controlada y riego de ahorro de agua		50%	48%-72%	[31]
Optimización de la gestión del agua y el nitrógeno		39%-47%	6.2%-23.5%	[36]
Uso de Biocarbón	13%-35%			[24],[26],[32],[39]-[42]
Uso de Estiércol	No se reportan datos			[44], [46]
Uso de Vermicompost	Esta estrategia no disminuyó pérdidas de nitrógeno			[34]
Uso de Zeolitas		45%		[55]

Nota. * Con respecto a prácticas convencionales de fertilización y riego

4.1.7.1 Sistemas integrados de producción agrícola. Dentro de esta categoría se presenta el estudio de Li et al. (2020), quienes compararon cultivos de arroz bajo monocultivo; cultivo mixto, donde se encuentran presentes diferentes variedades de arroz; y cocultivo mixto con patos, en el cual se combinaron las diferentes variedades de arroz con la cría de patos, encargados de consumir plagas de insectos, pisotear arrozales y excretar heces que producen algunos nutrientes importantes para el suelo. Uno de los principales objetivos del estudio era comprobar si los sistemas integrados agrícolas podrían aliviar la contaminación de fuentes hídricas debido al uso de pesticidas y de fertilizantes. Los investigadores determinaron que el cocultivo mixto con patos

incrementa la disponibilidad de los nutrientes en el suelo, sin embargo, tiene el mismo gasto de agua que un monocultivo (Li et al., 2020).

En cuanto a pérdidas de nitrógeno por lixiviación y escorrentía, el cocultivo mixto con patos disminuyó de forma significativa la tasa de pérdidas del nitrógeno total a 7.09%, seguido del cultivo mixto con un 13.89% del nitrógeno total perdido y, finalmente, el monocultivo convencional generó una pérdida del 39.8% (Li et al., 2020). Los resultados muestran que este tipo de estrategias pueden resultar muy útiles en un contexto agrícola similar, dado que se puede reducir no solo el uso de pesticidas, sino también el uso de fertilizantes y mitigar la contaminación de fuentes hídricas subterráneas y superficiales.

A pesar de que las estrategias relacionadas con los sistemas integrados de producción agrícola resultan muy interesantes y parecen ser muy provechosas, no se encontró más información que fuera útil para esta revisión, debido a los criterios de inclusión planteados inicialmente. Sin embargo, se espera que futuros estudios incluyan este tipo de estrategias que permiten un aprovechamiento cíclico de los recursos y ofrecen diversas ventajas para los agricultores y el medio ambiente.

4.1.7.2 Manejo de nutrientes y/o del agua. De acuerdo con la información obtenida, de los ocho (8) artículos de esta categoría, cuatro (4) evaluaron únicamente manejo de los fertilizantes como estrategia de mitigación de pérdidas; un (1) artículo evaluó solo el manejo del riego y en tres (3) artículos se estudió la superposición del manejo de fertilizantes y del riego para reducir las pérdidas de nitrógeno.

Husain et al. (2019) en su estudio sobre la aplicación óptima de diferentes fertilizantes orgánicos, sintéticos y de liberación controlada, en la cuenca del lago Erhai en China, encontraron que el fertilizante orgánico refinado con compuestos sintéticos (el cual contenía 45% de materia

orgánica, 2.4% de nitrógeno (N), 2.3% de óxido de fósforo (P_2O_5) y 5.7% de óxido de potasio, K_2O) disminuyó en un 47% la carga de nitrógeno total en el agua superficial y el agua lixiviada con respecto a las pérdidas por fertilización tradicional. Además, determinaron que la aplicación de fertilizante orgánico refinado combinado con la urea tradicional redujo la carga de nitrógeno total en un 46% sin afectar el rendimiento del cultivo de arroz. Por su parte, Cao et al. (2017) estudiaron las pérdidas de nitrógeno por escorrentía en una rotación de arroz-trigo en China y hallaron que la combinación de fertilizantes sintéticos con un 30% de fertilizante orgánico puede reducir pérdidas de nitrógeno hasta en un 64% en comparación con el tratamiento de fertilización convencional con productos sintéticos.

Xue et al. (2014) realizaron un experimento de campo para evaluar el efecto de diferentes manejos de fertilizantes sobre las pérdidas de nitrógeno por lixiviación en una rotación de arroz-trigo. Estos autores observaron una disminución de la lixiviación en 32% usando el tratamiento de fertilizante sintético combinado con fertilizante orgánico al 20%, con respecto al tratamiento de solo fertilizante sintético en el cultivo de arroz; mientras que en el cultivo de trigo la disminución fue del 48%. Por otro lado, Zhao et al. (2015) evaluaron pérdidas por lixiviación y emisiones gaseosas a partir de un experimento de campo, donde se evidenció que la adición de estiércol a los fertilizantes sintéticos redujo la lixiviación del nitrógeno en 21.86% y la emisión de óxido nitroso (N_2O) en 28.34%, pero aumentó las emisiones de metano (CH_4) en 137% en comparación con el tratamiento donde solo se utilizó fertilizante sintético.

En la región de Michoacán, México, el riego localizado por microaspersión en comparación con el riego tradicional redujo de forma significativa la lixiviación de nitratos en un cultivo de aguacate, donde la pérdida de nitratos pasó de 96 mg/L en riego tradicional a 47 mg/L en microaspersión en los primeros 90 cm de profundidad del perfil del suelo (Tapia Vargas et al.,

2012). Yu et al. (2022) realizaron un experimento de campo donde midieron emisiones de óxido nitroso (N_2O) y la lixiviación de nitrógeno en un cultivo de papa y hallaron que, en comparación con el riego por surcos, las emisiones de N_2O al implementar riego por goteo se redujeron en 81.36% y la lixiviación de nitrógeno disminuyó en 68.35%.

En el caso de cultivos como el arroz, donde se aplica riego por inundación, se hace necesario no solo generar prácticas que garanticen el rendimiento de los cultivos, sino que sean sostenibles y mitiguen el impacto debido al uso de elevados volúmenes de agua (Liang et al., 2017; Yang et al., 2015). Tanto el riego controlado como la fertilización nitrogenada de liberación controlada son métodos eficientes y relativamente sencillos para reducir la contaminación agrícola debido a pérdidas de nitrógeno por lixiviación, volatilización y emisiones de gases de efecto invernadero en cultivos de arroz. Yang et al. (2015) determinaron reducciones significativas en las pérdidas de nitrógeno al aplicar fertilización de liberación controlada y riego de ahorro de agua después de la etapa de reverdecimiento en cultivos de arroz. Esta práctica consiste en aplicar agua para mantener humedecido el suelo evitando el estancamiento de agua en el suelo cultivado, la lixiviación del nitrógeno disminuyó en aproximadamente un 50%, mientras que la escorrentía se redujo hasta en un 72% con la fertilización de liberación controlada, sin embargo la escorrentía no disminuyó de forma significativa al superponer fertilización de liberación controlada y riego de ahorro de agua (Yang et al., 2015).

Por su parte, Liang et al. (2017) comprobaron experimentalmente que la optimización de la gestión del nitrógeno y del agua, consistente en el uso de menores tasas de aplicación de fertilizantes con respecto al manejo convencional y en tan solo tres aplicaciones, combinado con riego de mojado y secado, donde se interrumpió el riego siete (7) días antes de la cosecha, aumentaron el rendimiento del grano de arroz y disminuyeron las pérdidas de nitrógeno por

escorrentía y lixiviación en un 39.1% y 6.2% en la temporada de arroz temprana y en un 46.7% y 23.5% en la temporada de arroz tardía, respectivamente, con respecto al tratamiento convencional.

4.1.7.3 Uso de enmiendas

4.1.7.3.1 Enmiendas orgánicas. Las enmiendas orgánicas ayudan a retener y/o aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo, mejorar sus propiedades físicas y químicas y, por consiguiente, son útiles para reducir pérdidas de nutrientes como el nitrógeno (Delgado-Londoño, 2017).

El biocarbón es el producto sólido de la pirólisis de la biomasa, tiene un alto contenido en carbono y puede modificar propiedades del suelo como el pH y la retención de agua, que ayuda a disminuir el drenaje y a su vez la lixiviación de nitratos; además, debido a que incrementa la capacidad de intercambio catiónico del suelo, ayudar a retener amonio (NH_4^+), por tanto, el nitrógeno permanece más tiempo en las capas de suelo donde es aprovechable para el cultivo (Weber & Quicker, 2018). Siete (7) de los 17 artículos de la categoría relacionada con el uso de enmiendas, estudiaron el uso de biocarbón como alternativa para reducir las pérdidas de nitrógeno.

Haider et al. (2017) analizaron el comportamiento de una rotación de cultivo de maíz, trigo y guisantes en presencia de biocarbón como enmienda, donde hallaron que las pérdidas de nitratos por lixiviación se redujeron, ya que el biocarbón aumentó la retención de humedad y de nitratos en las capas superiores de suelo (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm), de tal manera que en la capa más superficial se midieron 28 mg $\text{NO}_3^- \text{N/kg}$ de suelo con una dosis de 30Mg/ha; sin embargo, esta práctica afectó de forma negativa el rendimiento de los cultivos. Por su parte, Tian et al. (2018) lograron altos rendimientos de algodón al aplicar diferentes tasas de biocarbón derivado del maíz (0, 5, 10 y 20 ton/ha) en su experimento de tres años, donde al tercer año el rendimiento aumentó 21.9% con respecto a la dosis nula de la enmienda y con la mayor tasa de aplicación; además,

lograron reducir pérdidas de nitratos por lixiviación en 23.4% en comparación con el tratamiento sin biocarbón.

Demiraj et al. (2018) emplearon diferentes combinaciones de biocarbón con paja de trigo, fertilización convencional y raigrás (*Lolium multiflorum*) para medir la lixiviación de nitratos en zonas alrededor del lago Shkodra en Albania mediante un experimento con macetas, utilizando un suelo franco arenoso. Encontraron que la lixiviación de los nitratos se redujo en un 35% cuando se usó biocarbón, raigrás y paja de trigo en comparación con el control. Algunos autores como Ahmed et al. (2019) han estudiado la enmienda de biocarbón cuando se usa urea como fertilizante nitrogenado y se ha encontrado que esta práctica favorece la disminución de pérdidas de nitrógeno por lixiviación de nitratos y aumenta la retención de agua en el suelo sin presentar afectaciones significativas al rendimiento del cultivo.

Con el fin de controlar no solo las pérdidas de nitrógeno por lixiviación, sino también por volatilización y por emisiones gaseosas, además de garantizar un adecuado manejo del agua en los arrozales en China, Chen et al. (2021) realizaron un experimento donde combinaban el uso de biocarbón con fertilizantes convencionales y riego controlado y hallaron que la superposición de estas estrategias no solo mejoró el rendimiento del arroz hasta en un 15%, sino que también disminuyó la lixiviación del nitrógeno en un 13.4% con respecto al tratamiento sin biocarbón. Entonces, la fertilización con biocarbón representa grandes ventajas para la agricultura sostenible, ya que en diferentes tipos de cultivo ayuda a reducir pérdidas de nitrógeno en distintas formas mientras aumenta el rendimiento y favorece la retención de agua en el suelo (Zhou et al., 2021).

La enmienda de biocarbón es muy usada debido a los beneficios que ofrece en la agricultura, sin embargo, aún no es muy clara su influencia en la dinámica del nitrógeno en condiciones de riego controlado. En un campo de cebollas el comportamiento de las pérdidas de

nitrógeno por volatilización y emisiones gaseosas no fue representativo tras la adición de biocarbón más la fertilización tradicional y mostró una tendencia a aumentar la lixiviación del nitrógeno debido a su incapacidad de adsorber NO_3^- . En este caso, se consideró que los beneficios del biocarbón se pudieron ver afectados por el uso de riego controlado (Gao et al., 2020).

De otro lado, entre los fertilizantes orgánicos más comunes se encuentra el estiércol de origen animal, que puede ser de ganado bovino, porcino o avícola. El uso de estas enmiendas orgánicas puede resultar beneficioso para mantener bajas tasas de lixiviación de nitratos en el suelo en comparación con el uso convencional de fertilizantes sintéticos (González-Miranda et al., 2021). El objetivo de algunos estudios revisados fue establecer enmiendas que aumenten el rendimiento del cultivo y que a su vez sean sostenibles, no solo desde el punto de vista de pérdidas de nutrientes, sino que también las consideran alternativas al uso de pesticidas. Tal es el caso de Forge et al. (2016), quienes compararon diferentes pesticidas con estiércol de ave y compost y concluyeron que estas enmiendas mejoraron el rendimiento de cultivos de frambuesa en Canadá y ayudaron a reducir las poblaciones de parásitos sin aumentar el riesgo de lixiviación. A pesar de ello, el estiércol como fertilizante debe ser tratado previamente puesto que se ha comprobado que el estiércol fresco puede transmitir patógenos a algunos cultivos como las hortalizas (Vázquez-Vázquez et al., 2011).

Karimi et al. (2017) evaluaron el comportamiento de estiércol de cerdo combinado con paja para disminuir pérdidas por lixiviación de nitratos en una rotación de canola y cebada y hallaron que, al aplicar estas enmiendas seguidas de urea, se redujo el riesgo de lixiviación en sistemas de cultivo perenne, y se comprobó que durante el año 2011 la lixiviación en sistemas de cultivos anuales fue entre 80 y 250 veces mayor que en sistemas de cultivo perenne. A pesar de que el estiércol ayuda a mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos, el uso excesivo puede

generar pérdidas, sobre todo en suelos con textura gruesa (Nikiéma et al., 2013), por tanto, el estiércol de cerdo, tanto sólido como líquido, debe usarse con precaución en temporadas de alta precipitación, ya que induce altas concentraciones de nitrógeno en el suelo y aumenta el riesgo de lixiviación de nitratos.

Debido a la preocupación por el impacto ambiental causado por las emisiones de óxido nitroso y por lixiviación de nitratos, como consecuencia del uso de estiércol bovino como fertilizante en cultivos de hortalizas en humedales de África, Masaka & Chivandi (2017) realizaron un estudio de campo de una rotación de cultivo de tomate y canola para cuantificar estas vías de pérdida de nitrógeno. Estos autores hallaron que, al aumentar las tasas de aplicación de fertilizante y estiércol, se incrementó hasta en un 51% la lixiviación de nitratos y las emisiones de óxido nitroso aumentaron hasta en un 133%; no se observó linealidad entre la productividad de los cultivos y el aporte de nitrógeno de los fertilizantes. Por ello, el uso de estiércol de ganado como fertilizante debe ser limitado, sobre todo el proveniente de ganadería intensiva. Además, se deben tener diversas precauciones en el manejo del estiércol, tanto en su aplicación como en su almacenamiento, ya que el manejo inadecuado de este es una fuente de contaminación para los cultivos, el suelo y las aguas superficiales y subterráneas (Enriquez Haro, 2021). Es importante estabilizar el estiércol para aprovechar su valor como enmienda y fertilizante, de tal forma que se disminuyan los efectos nocivos para el medio ambiente tales como la emisión de gases de efecto invernadero, entre ellos el óxido nitroso (N_2O) (Hang et al., 2015).

El aprovechamiento de los desechos orgánicos en actividades agrícolas ayuda a reducir el impacto ambiental provocado por estos. Por ello, el proceso de vermicompostaje es una estrategia muy valiosa para la agricultura sostenible (Lazcano & Domínguez, 2011). La enmienda de vermicompost es una alternativa viable para reducir pérdidas de nitratos, sin embargo, podría

afectar la calidad del agua tras eventos de lluvia o riego al aumentar el riesgo de lixiviación (Broz et al., 2017). En la investigación de Broz et al. (2017) acerca del uso de vermicompost en un cultivo de fresa en Estados Unidos, se enmendaron dos tratamientos de suelo con tres tasas de vermicompost: 0, 10 y 25% en peso, combinados con un tratamiento de fertilizante sintético. A partir de ello, se observó un aumento de la biomasa de los cultivos, pero se promovió la lixiviación de nitratos (NO_3^-); en el estudio se halló que la lixiviación inicial oscilaba entre 1 y 5 g/L.

4.1.7.3.2 Enmiendas minerales. La incorporación de enmiendas minerales en suelos de cultivo favorece el crecimiento de los cultivos, ya que proporciona minerales adicionales a los que normalmente se encuentran en los suelos y aumenta su capacidad de intercambio catiónico (González-Fuentes et al., 2020). Las zeolitas son minerales aluminosilicatos y tienen una estructura cristalina y porosa que permite la retención de iones como el amonio (NH_4^+) y retrasar el proceso de nitrificación, por tanto, ayudan a mitigar los procesos de lixiviación (Jha & Hayashi, 2009; Soca & Daza-Torres, 2016). El uso de la zeolita natural en la agricultura ha crecido durante los últimos años, ya que mejora las propiedades químicas en el suelo, debido a su estructura en forma de panel que favorece la retención de nutrientes (Gholamhoseini et al., 2013; Zahedi et al., 2012).

Faccini et al. (2018) comprobaron que la enmienda de rocas volcánicas ricas en zeolitas en un suelo con cultivo de cereales aumentó la retención de amonio (NH_4^+) en el suelo, de tal manera que disminuyó pérdidas por lixiviación en un 45% y no afectó de forma negativa el rendimiento a pesar de que se aplicó una dosis de fertilizante nitrogenado inferior a la dosis usada comúnmente en la zona de estudio. Por su parte, Aghaalkhani et al. (2012) en su estudio sobre la influencia de las zeolitas en la pérdida y la eficiencia de uso del nitrógeno en un cultivo de canola hallaron que hay una relación negativa entre las tasas de aplicación de zeolita y la lixiviación de nitratos; además descubrieron que las dosis más altas de fertilizantes nitrogenados redujeron la

eficiencia de absorción del nitrógeno y establecieron que las dosis óptimas de zeolita y fertilizantes son de 9 ton/ha y 270 kg N/ha, respectivamente.

La combinación de zeolitas con el compost elaborado a partir de residuos sólidos urbanos es una alternativa con alto potencial para mitigar el impacto de los residuos y disminuir contaminación de aguas superficiales y subterráneas por efectos de lixiviación. En un cultivo de maíz se evaluó el comportamiento de dicha combinación, la cual aumentó la retención del agua en la capa superficial del suelo en un 12.6% en comparación con el tratamiento de compost sin zeolita, aumentó la absorción del nitrógeno y la eficiencia de uso del agua en 54.5% y 55.6%, respectivamente (Taheri-Soudejani et al., 2019).

4.2 Criterios para la selección de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas

La eficiencia de las estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno debe ser evaluada considerando criterios ambientales, económicos y sociales y técnicos (Giri & Nejadhashemi, 2014) con el fin de que su implementación aporte a la sostenibilidad agrícola. En los artículos revisados, se consideraron diferentes criterios e indicadores que se describen a continuación (Tabla 2). La evaluación de las estrategias se realizó a nivel de cuenca en todos los casos, excepto en el estudio de Giuliano et al. (2016), quienes realizaron su estudio en una parcela experimental.

4.2.1 Criterio social

La implementación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en un contexto específico debe considerar los intereses y percepciones de los agricultores, de tal forma que se contribuya al desarrollo socioeconómico de forma sostenible. A pesar de la importancia del aspecto social, solo (1) de los 10 artículos lo tuvo en cuenta para la evaluación de estrategias. Giri & Nejadhashemi

(2014) implementaron un método de análisis multicriterio para evaluar las mejores prácticas de gestión agrícola considerando factores ambientales, sociales y económicos.

Tabla 2.

Criterios e indicadores para la selección de estrategias identificados en los estudios

Criterios	Indicadores	Forma de medición	Datos requeridos	Referencia
Sociales	Percepción del área requerida	Consulta con servicio de Conservación de Recursos Naturales de Michigan	Área de implementación de las estrategias	[55]
Económicos	Costos de inversión	Sumatoria de los costos de insumos, mano de obra, maquinaria, instalación, entre otros.	Precios unitarios de insumos, mano de obra, maquinaria, entre otros.	[8], [55], [57]-[60]
	Costos de operación y mantenimiento	Modelos estadísticos/Modelos matemáticos	Costo de operación de la implementación de la estrategia	[55], [57], [58]
	Relación entre costos/ reducción de pérdidas de nitrógeno	Modelos estadísticos/Modelos empíricos	Tipo de cultivo, aportes de fertilizantes nitrogenados (N) y el rendimiento del cultivo	[56], [63]
Ambientales	Reducción de carga de contaminantes en el agua superficial	Uso de herramienta de simulación de cuencas hidrográficas/Modelo estadístico	Caudal de salida de la cuenca, concentración de contaminantes, tipos de cultivo, áreas de cultivo, tipos de estrategias agronómicas, datos topográficos, entre otros.	[55], [57], [60]
	Reducción de la tasa de erosión del suelo	Uso de herramienta de simulación de cuencas hidrográficas	La topografía, el uso del suelo, tipo de suelo y la red de arroyos	[55], [60], [65]
	Reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados	Medición experimental/ Uso de herramienta de simulación de cuencas hidrográficas/Modelo matemático	Caudal de salida de la cuenca, tipos de cultivo, topografía, tipos de estrategias agronómicas, datos hidrológicos, uso de la tierra, características de suelo, entre otros.	[8], [56], [58], [59], [63], [66]
Técnicos	Eficiencia de uso del nitrógeno	Modelo matemático	Adiciones y pérdidas de nitrógeno en el suelo	[8], [56]
	Rendimiento del cultivo	Masa de cultivo cosechado dividido entre área de cultivo	Datos de la masa del cultivo cultivado, área donde se sembró el cultivo	[24], [32], [54]

Para el criterio social, el indicador considerado fue “percepción del área requerida”, seleccionado tras consultar con una oficina de distrito del Servicio de Conservación de Recursos

Naturales en Michigan, y hace referencia al área necesaria para la implementación de la estrategia, corresponde a una medición cualitativa que indica la preferencia de cada una. A partir de una encuesta realizada a un grupo de agricultores se logró determinar que prefieren las estrategias que requieran de una menor área para su ejecución. Los datos del área requerida por cada una de las cinco prácticas agrícolas comparadas en este estudio se tomaron de bases de datos locales y nacionales (Giri & Nejadhashemi, 2014).

4.2.3 Criterio económico

Los factores económicos son determinantes cuando se busca seleccionar estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas (Ren et al., 2022). Todos los artículos evaluados consideraron este criterio en la selección de las mejores estrategias. Los indicadores considerados fueron: costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, y relación entre costos y reducción de la pérdida de nitrógeno. Los primeros se obtienen al sumar costos de insumos, mano de obra, maquinaria, entre otros, tomando como referencia valores de bases de datos, información local o a partir de proyecciones estadísticas (Ahmadi et al., 2015; De Laporte et al., 2021; Giri & Nejadhashemi, 2014; Giuliano et al., 2016; Maringanti et al., 2009; Sun et al., 2019).

Por su parte, los costos de operación y mantenimiento consisten en el dinero gastado para mantener la efectividad de la estrategia en el tiempo de implementación. Es posible determinar este valor a través de modelos matemáticos como lo hicieron Ahmadi et al., (2015) quienes utilizaron el Análisis Envolvente de Datos (DEA) (Charnes et al., 1978; Xu & Prato, 1995) para el análisis de las prácticas de conservación. Sun et al. (2019) implementaron un modelo empírico con el cual calcularon los costos de operación de acuerdo con la reducción de contaminantes. De forma similar, Giri & Nejadhashemi (2014) determinaron que el costo de operación corresponde al dinero gastado en la estrategia para mantener la reducción de los contaminantes durante un año,

los datos fueron suministrados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos - Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS).

El indicador correspondiente a la relación entre costos y la reducción de la pérdida de nitrógeno se puede calcular a partir de un modelo estadístico empírico, tal como hicieron De Laporte et al. (2021) para evaluar los efectos económicos de las pérdidas de nitrógeno por lixiviación y volatilización. A su vez, Ren et al. (2022) utilizaron el modelo de regresión de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) para estimar la relación entre la eficiencia de uso del nitrógeno y el desarrollo económico del país. Para realizar estos modelos estadísticos se requieren datos de presupuestos, tipo de cultivo, aporte de nitrógeno proveniente de los fertilizantes y rendimientos de los cultivos. De forma similar, Koo & O'connell (2006) implementaron un modelo agronómico para la estimación de la productividad agrícola en términos económicos considerando los efectos de las pérdidas de nitratos, a partir de datos del cultivo, fertilización aplicada, tipo de suelo, entre otros.

4.2.3 Criterio ambiental

El criterio ambiental es un factor determinante para la selección de una estrategia para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas, debido a la necesidad de disminuir la contaminación atmosférica, del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas (Ren et al., 2022). Los indicadores considerados para incluir este criterio en las evaluaciones de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno son: reducción de carga de contaminantes en el agua superficial, reducción de la tasa de erosión del suelo y reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados.

Respecto de la reducción de carga contaminante en el agua superficial, en los estudios revisados, se consideraron contaminantes como nitrógeno total, fósforo total, amonio, entre otros. En estos estudios generalmente se encontró el uso de herramientas de simulación de cuencas

hidrográficas; destacándose el modelo Soil Water and Assessment Tool (SWAT) de Arnold et al. (1998), el cual requiere datos de entrada como la topografía, el uso de suelo, datos hidrológicos y caudal en el cierre de la cuenca (Giri & Nejadhashemi, 2014; Maringanti et al., 2009). Por otro lado, Sun et al. (2019) emplearon un método estadístico para evaluar la reducción de carga de contaminantes. Para ello, tuvieron en cuenta las fuentes de los contaminantes, la eficiencia de remoción de cada contaminante en el cuerpo hídrico receptor y la pérdida de cada contaminante en una región específica. Dentro del ciclo del nitrógeno en el suelo, la erosión es una forma de pérdida (Mahmud et al., 2021), por lo tanto, es importante identificar cómo las estrategias de mitigación de pérdidas de nitrógeno afectan este indicador, tal como hicieron Giri & Nejadhashemi (2014), Maringanti et al. (2009) y Ricci et al. (2022) en sus estudios, donde determinaron la reducción de la tasa de erosión del suelo, con la herramienta de simulación de cuencas SWAT, para lo cual se emplearon los datos mencionados anteriormente.

Con respecto a la reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados, en los estudios seleccionados se encontró que ésta ha sido medida tanto de forma experimental, como lo hicieron Giuliano et al. (2016) y en los estudios de la fase 1 donde se midieron las pérdidas de nitrógeno en parcelas experimentales, macetas o lisímetros, como a través de modelos hidrográficos como SWAT (Ahmadi et al., 2015; Haas et al., 2017) o SHETRAN desarrollado por Ewen et al. (2000) e implementado en el estudio de Koo & O'connell (2006). Por su parte, De Laporte et al. (2021) usaron datos del estudio de Banger et al. (2020) obtenidos de un modelo de simulación del crecimiento de los cultivos y la dinámica de los nutrientes en el suelo.

4.2.4 Criterio técnico

El criterio técnico fue incluido en dos (2) artículos definidos bajo la denominación de criterio agronómico. El estudio de Ren et al., (2022) utilizó el modelo de sistemas humanos y

naturales acoplados (CHANS) desarrollado por Liu et al. (2007) para evaluar la eficiencia de uso del nitrógeno considerando el balance de nitrógeno en el área intervenida, el tipo de cultivo y las entradas y salidas de nitrógeno. Por su parte, el estudio de Giuliano et al. (2016) evalúa la eficiencia de uso del nitrógeno por medio de un modelo matemático aplicado a un cultivo de maíz donde requiere el nitrógeno residual en el suelo, el nitrógeno aplicado al cultivo y la producción de grano.

El rendimiento de los cultivos no fue considerado como indicador en los 10 artículos seleccionados en esta fase; sin embargo, es un aspecto fundamental para los agricultores y su consideración es clave cuando se implementan estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno. Este indicador se puede calcular de forma sencilla si se conoce la producción total del cultivo y la superficie cultivada (Faccini et al., 2018; Haider et al., 2017; Tian et al., 2018).

4.3 Propuesta de alternativas y criterios para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo

4.3.1 Estrategias

De acuerdo con la información obtenida a partir de la revisión no es conveniente proponer alternativas relacionadas con sistemas integrados de producción agrícola ya que no hay datos suficientes que sustenten sus beneficios en agroecosistemas de páramo.

Las estrategias relacionadas con el manejo de los nutrientes y/o del agua son funcionales en diferentes tipos de ecosistemas y para distintos cultivos. En este caso, se propone la implementación de fertilizantes orgánicos a partir de tecnologías como el compostaje, que aumente la eficiencia de uso del nitrógeno logrando mitigar pérdidas y adecuándose a las condiciones sociales y culturales de un agroecosistema de páramo. El manejo del riego en los cultivos es útil en la reducción de pérdidas de nitrógeno, sin embargo, no se propone un cambio al tipo de riego sino un ajuste a las frecuencias y tasas de aplicación de agua según las necesidades del cultivo para

reducir las pérdidas de nitrógeno y a su vez, dar un manejo eficiente del recurso hídrico. Además, debido a los beneficios ya mencionados se propone la superposición de estas dos estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo.

Las diferentes enmiendas descritas en este estudio resultan útiles en la disminución de pérdidas de nitrógeno por lixiviación y/o escorrentía. El biocarbón fue útil en todos los casos mencionados y no afectó el rendimiento de cultivos, por ello puede ser una alternativa para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo, ya que se ha demostrado que se adapta a los diferentes tipos de suelo, clima y cultivo. En el caso de las enmiendas de origen mineral, la zeolita es una opción viable para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo, al ser una fuente adicional de nutrientes para el suelo ayuda a mejorar la eficiencia de los cultivos, es sencilla de aplicar y no presenta efectos negativos en la calidad de los cultivos.

4.3.2 Criterios

Las áreas de uso agrícola en un ecosistema son limitadas y están establecidas con extensiones de tierra fijas donde se busca dar un uso sostenible a los sistemas agrícolas implementados, principalmente al uso adecuado de los fertilizantes que se agregan al suelo según lo especificado por el Código internacional de conducta para el uso y manejo sostenible de fertilizantes (FAO, 2019). Esto adquiere mayor relevancia en un agroecosistema de páramo debido a la abundancia de los recursos hídricos, por ende, se deben establecer criterios para evaluar la viabilidad de las estrategias implementadas. En la Tabla 3 se muestran los criterios e indicadores propuestos para la evaluación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en agroecosistemas de páramo.

Tabla 3.*Criterios e indicadores propuestos para agroecosistemas de páramo*

Criterios	Indicadores
Sociales	Percepción de los beneficios de la estrategia
	Disponibilidad de los insumos en la zona de implementación de la estrategia
Económicos	Relación entre costos de inversión y área de implementación
	Relación entre costos de operación y mantenimiento y área de implementación
	Relación entre costos y reducción de pérdidas de nitrógeno
	Capacidad adquisitiva del agricultor
Ambientales	Reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados
Técnicos	Rendimiento del cultivo

El criterio social identificado en la revisión de literatura, cuyo indicador se determina como “percepción de área requerida” (Giri & Nejadhashemi, 2014) se puede adaptar al considerar otros aspectos de la estrategia, por lo que se propone indicador “percepción de los beneficios de la estrategia” A través de éste se analizaría cualitativamente la percepción de los agricultores sobre las ventajas que obtienen de la implementación de cada una de las estrategias y la medida en que están dispuestos a implementar prácticas agrícolas alternativas que sean sostenibles. Además, es importante considerar la disponibilidad de los insumos requeridos para llevar a cabo la estrategia en la zona de ejecución, por ello se propone el indicador cualitativo denominado “Disponibilidad de los insumos en la zona de implementación de la estrategia”.

En un agroecosistema de páramo el factor económico es limitante debido a la baja diversidad de cultivos que se pueden desarrollar (Díaz et al., 2020). En este sentido, los costos requeridos para llevar a cabo una estrategia deben ser consecuentes con los beneficios ambientales

generados, entre ellos la reducción de las pérdidas de nitrógeno. Los indicadores económicos encontrados en los 10 artículos son aplicables en un agroecosistema de páramo, sin embargo, para comparar las estrategias se recomienda relacionar los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento con el área de implementación. Entonces, los indicadores propuestos son: “relación entre costos de inversión y área de implementación”, “relación entre costos de operación y mantenimiento, y área de implementación”, y “relación entre costos y reducción de pérdidas de nitrógeno”. Además, se debería considerar un indicador adicional que tenga en cuenta la capacidad del agricultor para costear la implementación de la estrategia denominado “capacidad adquisitiva del agricultor”.

En criterios ambientales no se recomienda considerar el indicador “reducción de carga de contaminantes en el agua superficial”, debido a que la toma de datos tiene en cuenta todas las fuentes hídricas afectadas y las diversas causas de la contaminación, que, en muchos casos, pueden no estar relacionadas con el uso agrícola. En el caso de “reducción de la tasa de erosión del suelo” es complejo hallar un parámetro que relacione de forma directa la erosión de suelo con la pérdida de nitrógeno en suelos cultivados. El indicador aplicable es la “reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados”, analizando la pérdida por lixiviación por medio de muestras tomadas a diversas profundidades en las parcelas experimentales.

En cuanto a los criterios técnicos, se propone el indicador “rendimiento del cultivo” para agroecosistema de páramo, debido a que se busca reducir las pérdidas de nitrógeno dando un uso eficiente en su aplicación y que esto no altere de forma negativa la producción de los cultivos (FAO, 2019).

5. Conclusiones

Se identificaron estrategias de reducción de pérdidas de nitrógeno enfocadas en la implementación de sistemas integrados de producción agrícola, manejo de nutrientes y/o del agua y uso de enmiendas. Para un agroecosistema de páramo, se propone la implementación de estrategias que establezcan el uso de fertilizante orgánico mediante un producto compostado, el manejo del riego en los cultivos y el uso de enmiendas como la zeolita y el biocarbón. Por otra parte, se determinó que los estudios evaluaron principalmente criterios ambientales y económicos, sin embargo, también se establecieron criterios técnicos y sociales. Los indicadores de evaluación propuestos para un agroecosistema de páramo en el aspecto social son “percepción de los beneficios de la estrategia” y “disponibilidad de los insumos en la zona de implementación”; para el criterio económico se determinó “relación entre costos de inversión y área de implementación”, “relación entre costos de operación y mantenimiento, y área de implementación”, y “relación entre costos y reducción de pérdidas de nitrógeno”; en el aspecto ambiental, “reducción de pérdidas de nitrógeno en suelos cultivados” y en el técnico el “rendimiento del cultivo”.

Referencias

- Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., & Sadat Asilan, K. (2012). Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(10), 1149–1169.
- Ahmadi, M., Arabi, M., Fontane, D. G., & Engel, B. A. (2015). Application of multicriteria decision analysis with a priori knowledge to identify optimal nonpoint source pollution control plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(2), 4014054.
- Ahmed, R., Li, Y., Mao, L., Xu, C., Lin, W., Ahmed, S., & Ahmed, W. (2019). Biochar effects on mineral nitrogen leaching, moisture content, and evapotranspiration after 15N urea fertilization for vegetable crop. *Agronomy*, 9(6), 331.
- Alvarez, R. (2006). Balance de nitrógeno en cultivos de trigo. *INTA-Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Información Técnica de Trigo, Campaña, 105*.
- ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias.* (n.d.).
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Banger, K., Wagner-Riddle, C., Grant, B. B., Smith, W. N., Drury, C., & Yang, J. (2020). Modifying fertilizer rate and application method reduces environmental nitrogen losses and increases corn yield in Ontario. *Science of The Total Environment*, 722, 137851.
- Broz, A., Verma, P., Appel, C., Yost, J., Stubler, C., & Hurley, S. (2017). Nitrogen dynamics of strawberry cultivation in vermicompost-amended systems. *Compost Science & Utilization*,

25(3), 194–205.

Cao, Y., Sun, H., Liu, Y., Fu, Z., Chen, G., Zou, G., & Zhou, S. (2017). Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4841–4850.

Cárdenas, R., Farías, R., Sanchez, J., & Peña, J. (2004). Contribution of nitrogen to agriculture. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 7.

Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444.

Chen, X., Yang, S.-H., Jiang, Z.-W., Ding, J., & Sun, X. (2021). Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125811.

Daza, M. (2018). Estrategias para la optimización de la fertilización nitrogenada y reducción de la lixiviación de nitratos en sistemas productivos en plantas aromáticas. *Universidad Del Valle*, 171.

De Laporte, A., Banger, K., Weersink, A., Wagner-Riddle, C., Grant, B., & Smith, W. (2021). Economic and environmental nitrate leaching consequences of 4R nitrogen management practices including use of inhibitors for corn production in Ontario. *Journal of Environmental Management*, 300, 113739.

Delgado-Londoño, D. M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos*, 17, 77–83.

Demiraj, E., Libutti, A., Malltezi, J., Rroço, E., Brahushi, F., Monteleone, M., & Sulçe, S. (2018). Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 93–102.

- Díaz, J., Valera, J., Ordóñez, W., Solanilla, M., & Bahamón, Á. (2020). *Agricultura en páramos: entre la conservación y los derechos de las comunidades* (p. 32). FESCOL.
- Enriquez Haro, J. T. (2021). *Los abonos orgánicos: ventajas y desventajas en los cultivos hortícolas de la costa ecuatoriana*. BABAHOYO: UTB, 2021.
- Ewen, J., Parkin, G., & O'Connell, P. E. (2000). SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), 250–258.
- Faccini, B., Di Giuseppe, D., Ferretti, G., Coltorti, M., Colombani, N., & Mastrocicco, M. (2018). Natural and NH₄⁺-enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(2), 327–341.
- FAO. (2019). *The international code of conduct for the sustainable use and management of fertilizers*.
- Ferreira, J., Eva, R., Chaves, R., Soriano, M., Cano, & Jose Manuel Flores de Lemus Climatología. (n.d.). *CLIMA MONZONICO*.
- Forge, T., Kenney, E., Hashimoto, N., Neilsen, D., & Zebarth, B. (2016). Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 48–58.
- Gao, S., Wang, D., Dangi, S. R., Duan, Y., Pflaum, T., Gartung, J., Qin, R., & Turini, T. (2020). Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field. *Science of The Total Environment*, 714, 136432.
- Gholamhoseini, M., Ghalavand, A., Khodaei-Joghan, A., Dolatabadian, A., Zakikhani, H., & Farmanbar, E. (2013). Zeolite-amended cattle manure effects on sunflower yield, seed

- quality, water use efficiency and nutrient leaching. *Soil and Tillage Research*, 126, 193–202.
- Giri, S., & Nejadhashemi, A. P. (2014). Application of analytical hierarchy process for effective selection of agricultural best management practices. *Journal of Environmental Management*, 132, 165–177.
- Giuliano, S., Ryan, M. R., Véricel, G., Rametti, G., Perdrieux, F., Justes, E., & Alletto, L. (2016). Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. *European Journal of Agronomy*, 76, 160–175.
- González-Fuentes, J. A., Jiménez-López, D., Sandoval-Rangel, A., Hernández-Perez, A., Medrano-Macías, J., & Preciado-Rangel, P. (2020). Efecto de enmiendas minerales sobre el contenido mineral y antioxidantes en frutos de frambuesa. *Biotecnia*, 22(1), 48–55.
- González-Miranda, I., Vidal, K., & Peñaloza, P. (2021). Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 81(2), 210–219.
- Haas, M. B., Guse, B., & Fohrer, N. (2017). Assessing the impacts of Best Management Practices on nitrate pollution in an agricultural dominated lowland catchment considering environmental protection versus economic development. *Journal of Environmental Management*, 196, 347–364.
- Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C., & Kammann, C. I. (2017). Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 237, 80–94.
- Hang, S., Castán, E., Negro, G., Daghero, A., Buffa, E., Ringuélet, A., Satti, P., & Mazzarino, M. J. (2015). Compostaje de estiércol de feedlot con aserrín/viruta: características del proceso y del producto final. *Agriscientia*, 32(1), 55–65.

- Harindintwali, J. D., Zhou, J., Muhoza, B., Wang, F., Herzberger, A., & Yu, X. (2021). Integrated eco-strategies towards sustainable carbon and nitrogen cycling in agriculture. *Journal of Environmental Management*, 293, 112856. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112856>
- Husain, A., Muneer, M. A., Fan, W., Gao-Fei, Y., Shi-Zhou, S., Feng, W., Yuan, L., & Ke-Qiang, Z. (2019). Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH_4^+-N , NO_3^--N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(6), 716–738.
- ICONTEC. (2019). NTC 1927, Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Definiciones y clasificación. *Norma Técnica Colombiana*.
- Jha, V. K., & Hayashi, S. (2009). Modification on natural clinoptilolite zeolite for its NH_4^+ retention capacity. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 29–35.
- Karimi, R., Akinremi, W., & Flaten, D. (2017). Cropping system and type of pig manure affect nitrate-nitrogen leaching in a sandy loam soil. *Journal of Environmental Quality*, 46(4), 785–792.
- Koo, B. K., & O'connell, P. E. (2006). An integrated modelling and multicriteria analysis approach to managing nitrate diffuse pollution: 2. A case study for a chalk catchment in England. *Science of the Total Environment*, 358(1–3), 1–20.
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: impact on plant growth and soil fertility. *Soil Nutrients*, 10(1–23), 187.
- Li, M. J., Li, R. H., Zhang, J. E., Guo, J., Zhang, C. X., Liu, S. W., Hei, Z. W., & Qiu, S. Q. (2020). Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the

- nonpoint source pollution from rice (*Oryza sativa* L.) production. *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH*, 18(1), 1281–1300.
- Liang, K., Zhong, X., Huang, N., Lampayan, R. M., Liu, Y., Pan, J., Peng, B., Hu, X., & Fu, Y. (2017). Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system. *Science of the Total Environment*, 609, 46–57.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Folke, C., Alberti, M., Redman, C. L., Schneider, S. H., Ostrom, E., Pell, A. N., & Lubchenco, J. (2007). Coupled human and natural systems. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(8), 639–649.
- Mahmud, K., Panday, D., Mergoum, A., & Missaoui, A. (2021). Nitrogen Losses and Potential Mitigation Strategies for a Sustainable Agroecosystem. *Sustainability*, 13(4), 2400.
- Maringanti, C., Chaubey, I., & Popp, J. (2009). Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research*, 45(6).
- Masaka, J., & Chivandi, E. (2017). Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle manure and mineral nitrogen fertiliser. *South African Journal of Plant and Soil*, 34(2), 105–117.
- Mayz-Figueroa, J. (2004). Fijación biológica de nitrógeno. *Revista Científica UDO Agrícola*, 4(1), 1–20.
- Nikiéma, P., Buckley, K. E., Enns, J. M., Qiang, H., & Akinremi, O. O. (2013). Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(5), 573–584.
- Portocarrero, N. O., Ortíz, J. E. D., Daza, M. C., & Rodríguez, H. F. A. (2016). Efecto de la

- aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. *Acta Agronomica*, 65(1), 24–30.
- Ren, C., Zhang, X., Reis, S., & Gu, B. (2022). Socioeconomic barriers of nitrogen management for agricultural and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 333, 107950.
- Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–22.
- Ricci, G. F., D'Ambrosio, E., De Girolamo, A. M., & Gentile, F. (2022). Efficiency and feasibility of Best Management Practices to reduce nutrient loads in an agricultural river basin. *Agricultural Water Management*, 259, 107241.
- Rincón, L. N. G. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare*, 19, 127–136.
- Sharma, L. K., & Bali, S. K. (2017). A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. *Sustainability*, 10(1), 1–23.
- Soca, M., & Daza-Torres, M. C. (2016). Evaluation of particle size fractions and doses of zeolot for agriculture. *Agrociencia*, 50(8), 965–976.
- Solanilla, M., Díaz, J. L., Varela, J. D., & Ordoñez, W. (n.d.). *Vida digna, justicia ambiental y social: el debate alrededor de los páramos*.
- Stuart, D., Schewe, R. L., & McDermott, M. (2014). Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: Understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. *Land Use Policy*, 36, 210–218.
- Sun, X., Hu, Z., Li, M., Liu, L., Xie, Z., Li, S., Wang, G., & Liu, F. (2019). Optimization of

- pollutant reduction system for controlling agricultural non-point-source pollution based on grey relational analysis combined with analytic hierarchy process. *Journal of Environmental Management*, 243, 370–380.
- Taheri-Soudejani, H., Heidarpour, M., Shayannejad, M., Shariatmadari, H., Kazemian, H., & Afyuni, M. (2019). Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 47(8), 1800257.
- Tapia Vargas, L. M., LARIOS GUZMÁN, A., Contreras, J. A., VIDALES FERNÁNDEZ, I., & Barradas, V. L. (2012). Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (Persea americana Mill.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(3), 251–258.
- Tian, X., Li, C., Zhang, M., Wan, Y., Xie, Z., Chen, B., & Li, W. (2018). Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield. *PLoS One*, 13(1), e0189924.
- Vázquez-Vázquez, C., García-Hernández, J. L., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., Valdez-Cepeda, R. D., Orona-Castillo, I., Gallegos-Robles, M. Á., & Preciado-Rangel, P. (2011). Aplicación de estiércol solarizado al suelo y la producción de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 17(SPE1), 69–74.
- Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., & Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. *MasAgro*, 12.
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217, 240–261.
- Xu, F., & Prato, T. (1995). *Measuring technical efficiency using data envelopment analysis: A simulation study of K films and N inputs*. Iowa State University, Department of Economics.

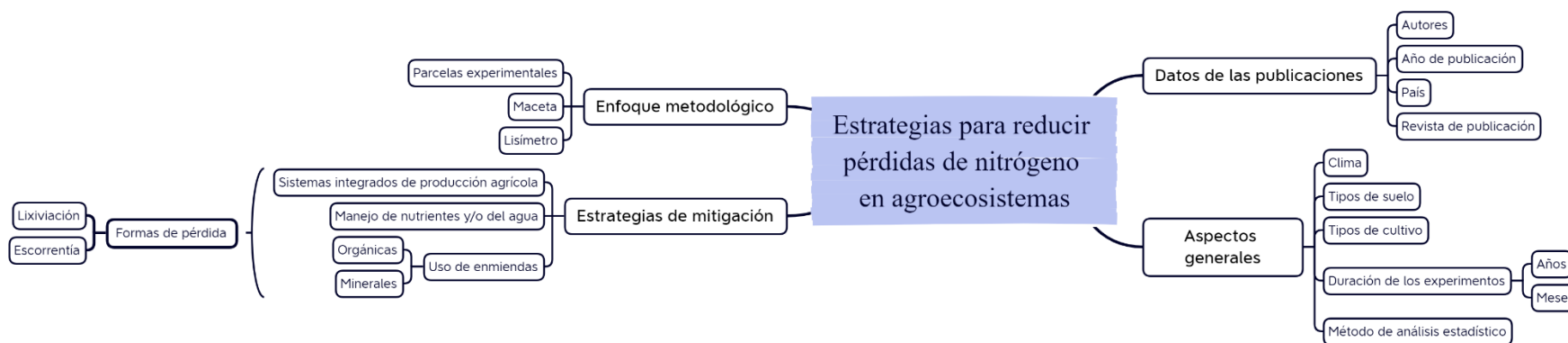
- Xue, L., Yu, Y., & Yang, L. (2014). Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice–wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management. *Environmental Research Letters*, 9(11), 115010.
- Yang, S., Peng, S., Xu, J., He, Y., & Wang, Y. (2015). Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 13(1), 71–80.
- Yu, Y., Jiao, Y., Yang, W., Song, C., Zhang, J., & Liu, Y. (2022). Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 260(December 2020), 107270. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107270>
- Zahedi, H., Shirani-Rad, A. H., & Tohidi-Moghadam, H. R. (2012). Zeolite and selenium application and their effects on production and physiological attributes of canola cultivars under water stress. *Agrociencia*, 46(5), 489–497.
- Zhao, Z., Yue, Y., Sha, Z., Li, C., Deng, J., Zhang, H., Gao, M., & Cao, L. (2015). Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation. *Atmospheric Environment*, 119, 393–401.
- Zhou, M., Ying, S., Chen, J., Jiang, P., & Teng, Y. (2021). Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(46), 65188–65199.
- Zimmer, A. H., Macedo, M. C. M., Kichel, A. N., & Euclides, V. P. B. (1999). Sistemas integrados de producción agropastoril. *Sistemas Agropastoriles En Sabanas Tropicales de América Latina. Sl: CIAT*, 245–283.

Apéndices

Apéndice A. Ecuaciones de búsqueda de estudios primarios sobre estrategias para reducción de pérdidas de nitrógeno

Categoría	Ecuación de búsqueda
Sistemas integrados de producción agrícola	"Integrated farming system" AND nitrogen "farming system" AND "nitrogen use"
Manejo de nutrientes y/o agua en el suelo	"fertilizer management" AND "nitrogen losses" agriculture AND fertilizer AND "nitrogen losses" ("nutrient management" OR "water management") AND agriculture AND "nitrogen losses"
Uso de enmiendas	agriculture AND biochar AND "nitrogen losses" "nitrate leaching" AND agriculture AND amendment

Apéndice B. Mapa de información a extraer en las publicaciones



Apéndice C. Información general de las publicaciones seleccionadas**Tabla C4.***Información bibliográfica sobre los estudios*

Artículo	Año publicación	Revista	Autor(es)	Lugar de estudio	País
Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (<i>Oryza sativa</i> L.) production	2020	Applied Ecology and Environmental Research	LI, M. J – Li, R. H– Zhang, J – Guo, J– Zhang, C. X – Liu, S. W– Hei, Z W.– Qiu, S. Q.	Granja de enseñanza e investigación Zengcheng (23°14'N, 113°38'E), Universidad Agrícola del Sur de China, Guangzhou, China	China
Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation	2022	Agricultural Water Management	Yu, Y., Jiao, Y., Yang, W., (...), Zhang, J., Liu, Y.	Base experimental en el suburb of Hohhot, Inner Mongolia, China, (40° 45' 34" N, 111° 41' 56" E)	China
Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH ₄ ⁺ -N, NO ₃ -N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China	2019	Communications in Soil Science and Plant Analysis	Husain, A., Muneer, M.A., Fan, W., (...), Yuan, L., Ke-Qiang, Z.	Estación científica de observación y experimentación de Dali (25°50' N, 100°07'E) de Agroambiente, Ministerio de Agricultura, China	China

Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management	2017	Environmental Science and Pollution Research	Yansheng Cao, Huifeng Sun, Yaqin Liu, Zishi Fu, Guifa Chen, Guoyan Zou & Sheng Zhou	Estación experimental integrada de Zhuanghang, situada en la ciudad de Shanghai del delta del río Yangtze	China
Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields	2013	Paddy and Water Environment	Yang, S., Peng, S., Xu, J., He, Y., Wang, Y.	Estación experimental de riego y drenaje de Kunshan. Lago Taihu, China	China
Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (Persea americana Mill.)	2012	Revista Internacional de Contaminación ambiental	Luis Mario Tapia Vargas, Antonio Larios Guzmán, José Anguiano Contreras, Ignacio Vidales Fernández y Víctor L. Barradas	Localidad de Choritiro, municipio de Tancítaro, Michoacán	México
Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management	2014	Environmental Research Letters	Lihong Xue, Yingliang Yu and Linzhang Yang	Campo de Longyan (31°31'N, 120°06'E), pueblo de Hudai, ciudad de Wuxi, provincia de Jiangsu, China	China

Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system	2017	Science of the Total Environment	Kaiming Liang, Xuhua Zhong, Nongrong Huang, Rubenito M. Lampayan, Yanzhuo Liu, Junfeng Pan, Bilin Peng, Xiangyu Hu, Youqiang Fu	Estación experimental Dafeng de la academia de ciencias agrícolas de Guangdong (113°20'E, 23°08'N), Guangzhou, provincia de Guangdong, China	China
Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation	2015	Atmospheric Environment	Zheng Zhao, Yubo Yue, Zhimin Sha, Changsheng Li, Jia Deng, Hanlin Zhang, Maofang Gao, Linkui Cao	Estación de extensión de tecnología de riego del distrito de Qingpu, Shanghai, China	China
Natural and NH ₄ ⁺ -enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy)	2018	Nutrient Cycling in Agroecosystems	Faccini, B., Di Giuseppe, D., Ferretti, G., (...), Colombani, N., Mastrocicco, M.	Situado a 40 km al este de la ciudad de Ferrara (44°50'33"N y 12°05'40"E, Italia) y a 15 km hacia el interior del mar Adriático	Italia
Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study	2017	Agriculture, Ecosystems and Environment	Haider, G., Steffens, D., Moser, G., Müller, C., Kammann, C.I.	Estación de investigación de Justus Liebig University Giessen, Germany. (49°45'N and 8°29'E)	Alemania

Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil	2012	Archives of Agronomy and Soil Science	of	Aghaalikhani, M., Gholamhoseini, M., Dolatabadian, A., Khodaei-Joghan, A., Sadat Asilan, K.	Granja de investigación de la Universidad Tarbiat Modares, Teherán, Irán (35° 41' N, 51° 19' E)	Irán
Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield	2018	Plos one		Tian, X., Li, C., Zhang, M., (...), Chen, B., Li, W.	Aldea de Zhoulianchi (34° 58' N, 116° 10' E), condado de Jinxiang, provincia de Shandong, China.	China
Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching	2016	Agriculture ecosystems environment	&	Forge, T; Kenney, E; (...); Zebarth, B	Canada (Lat. 49° 07' N, Long. 122° 09' W)	Canadá
Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile	2021	Chilean journal of agricultural research		Gonzalez-Miranda, I; Vidal, K and Penaloza, P	Quillota (32° 53' S, 71° 12' W), Valparaíso Region, Chile	Chile
Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania	2018	Italian Journal of Agronomy		Demiraj, E; Libutti, A; (...); Sulce, S	Se encuentra a unos 20 km de la costa adriática (42° 04' 03" N; 19° 30' 47' E), en la frontera entre Albania al sur y Montenegro al norte.	Albania
Nitrogen Dynamics of Strawberry Cultivation in	2017	Compost science & utilization		Broz, A; Verma, P; (...); Hurley, S	Universidad estatal Politécnica de California	Estados Unidos

Vermicompost-Amended Systems

Biochar Effects on Mineral Nitrogen Leaching, Moisture Content, and Evapotranspiration after N-15 Urea Fertilization for Vegetable Crop	2019	Agronomy-basel	Ahmed, R; Li, YZ; (...); Ahmed, W	Invernadero del instituto de agricultura y desarrollo sostenible del distrito de Haiden, Pekín (China)	China
Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field	2021	Journal of Cleaner Production	Chen, X; Yang, SH; (...); Sun, X	Laboratorio estatal clave de recursos hídricos e ingeniería hidráulica de la Universidad de Hohai	China
Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada	2013	Canadian journal of soil science	Nikiema, P; Buckley, KE; (...); Akinremi, OO	Municipio rural de North Cypress, en el suroeste de Manitoba, Canadá	Canadá
Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field	2020	Science of the Total Environment	Gao, S., Wang, D., Dangi, S.R., (...), Qin, R., Turini, T.	USDA-ARS, Centro de ciencias agrícolas del Valley Agricultural Sciences Center, Parlier	Estados Unidos
Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield	2019	Clean - Soil, Air, Water	Taheri-Soudejani, H., Heidarpour, M., Shayannejad, M., (...), Kazemian, H., Afyuni, M.	Invernadero de investigación de la Universidad Tecnológica de Isfahan, Isfahan, Irán (51° 26' 43 "E, 32° 27 39 "N)	Irán
Cropping system and type of pig manure affect nitrate-	2017	Journal of Environmental Quality	Karimi, R., Akinremi, W., Flaten, D.	Estación de investigación de Campo de la	Canadá

nitrogen leaching in a sandy loam soil				Universidad de Manitoba, Carman, MB	
Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle manure and mineral nitrogen fertiliser	2017	South African Journal of Plant and Soil	Masaka, J., Chivandi, E	Dufuya (19°17' S; 29°21' E) en las tierras comunales de Lower Gweru Communal Lands, a unos 42 km al oeste de la ciudad de Gweru, Zimbabwe	Zimbabwe
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	2021	Environmental Science and Pollution Research	Zhou, M., Ying, S., Chen, J., Jiang, P., Teng, Y.	(31° 15" N, 119° 43" E) China	China
Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff	2019	Revista Brasileira de la Ciencia del Suelo	Kaufmann, Danieli Schneiders; Bertol, Ildegardis; et all	Santa Catarina, Brazil. Se estudiaron dos suelos: uno cerca de la ciudad de São José do Cerrito (27° 43' S and 50° 31' O) y otra cerca de la ciudad de Lages (27° 47' S and 50° 18' O)	Brazil

Tabla C5.*Características ambientales y de suelo de los estudios*

Artículo	Características ambientales y del suelo			
	Precipitación promedio anual	Altitud	Características del suelo	Condiciones Climáticas
Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (<i>Oryza sativa</i> L.) production	1738 mm		Franco arenoso	Clima monzónico subtropical. Temperatura promedio de 22.75°C
Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation	400 mm	1045,4 msnm	Suelo castaño con una textura franco-arcillosa arenosa que comprende 17,6% arcilla, 15,8% limo y 77,5% arena	Clima continental monzónico de la zona templada media. La temperatura promedio es de 6.7°C
Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH ₄ ⁺ -N, NO ₃ -N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China	1048 mm			Clima monzónico subtropical. La temperatura promedio es de 15.1°C

Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management	398 mm			Clima subtropical con una variación de la temperatura media diaria de 12,1 a 33,5 °C
Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields	1000mm		Antrosol	Clima monzónico subtropical, temperatura promedio de 15.5°C. Heladas 234 días al año.
Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (Persea americana Mill.)	1256 mm	1960msnm	Vitric Hapludand, derivado de cenizas volcánicas	Clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano. Temperatura promedio anual 15.5°C
Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management	1177		Arrozal hidrágico (franco limoso, mesic Mollic Endoaquepts)	La temperatura media anual en esta región es de 15,7 °C
Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system				Zona climática monzónica húmeda subtropical. La temperatura media es de 26,3 °C en la temporada de arroz temprana, de abril a julio, y de 25,8 °C en la temporada de

				arroz tardía, de agosto a noviembre.
Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation	1087.3 mm		Entisol Pup-Orthic. Antrosol	El clima local es subtropical húmedo monzónico, con una temperatura media diaria de 16,7 C
Natural and NH ₄ ⁺ -enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy)	500-800 mm		Suelo arcillo limoso	Clima subcontinental. La temperatura en la primera mitad del año oscila entre 4°C y 27°C, luego oscila en 36°C.
Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study	600 mm	90-145 msnm	Suelo sedimentario apartir de depositos de rio	Temperatura promedio de 9,8°C
Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil	298 mm	1215 msnm	Suelo franco arenoso	Temperatura promedio de 18,88°C
Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield	700 mm			Temperatura oscilante en 0°C y 40°C

Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching		Marga arenosa bien gradada	
Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile	236 mm		
Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania	750 mm	Suelo franco arenoso	Clima mediterráneo
Nitrogen Dynamics of Strawberry Cultivation in Vermicompost-Amended Systems		50% arena 50% turba	arena fina
Biochar Effects on Mineral Nitrogen Leaching, Moisture Content, and Evapotranspiration after N-15 Urea Fertilization for Vegetable Crop	447-580 mm		Clima monzónico típico Temperatura 10-12 °C
Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field	1097.1 mm	Suelo de arrozal hidromorfo de color amarillo oscuro	Clima monzónico subtropical, temperatura promedio de 15.5°C,
Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and	456 mm	Arena limosa	Clima de pradera subhúmeda. La temperatura promedio varía entre -16.3°C en

wheat yield on a sandy loam soil of western Canada				enero hasta 18.6°C en junio.
Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field				Hanford (franco-arcilloso, mixto, superactivo, no ácido, térmico Typic Xerorthents)
Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield				Franco arenoso
Cropping system and type of pig manure affect nitrate-nitrogen leaching in a sandy loam soil				Franco arenoso
Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle manure and mineral nitrogen fertiliser	725mm	1260 msnm	Udic Kandiuustalf (USDA) y Gleyic Luvisol (FAO)	Temperatura media anual es de 21 °C
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	1600mm		Suelo predominantemente limo con partes aproximadamente iguales de arena y arcilla	Clima monzónico subtropical, temperatura media de 15.6 °C. El 70% de la precipitación cae de mayo a agosto
Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff		800msnm y 900msnm	Para São José do Cerrito: Nitossolo Bruno aluminoférrico húmico, un alfisol. Para ciudad de Lages Cambissolo Húmico aluminico léptico, un inceptisol	Clima subtropical, húmedo, lluvioso, con veranos frescos

Tabla C6.*Detalles metodológicos sobre los estudios*

Artículo	Condición agrícola		Estrategia empleada	Categoría
	Área de estudio	Enfoque metodológico		
Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (<i>Oryza sativa</i> L.) production	35 m ² Lotes de 5x7 m	Parcela experimental	Comparativo de sistemas de arroz de monocultivo, cultivo mixto y cocultivo mixto con patos para mirar la eficiencia de los nutrientes	Sistemas integrados de producción agrícola
Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation	8 hileras separación entre hilera de 90cm, altura de la planta 30cm y largo de 11.2 m	Parcela experimental	Combinación de 3 adiciones graduales de fertilizante con 2 sistemas de riego (goteo y convencional) para comparar la pérdida de nitrógeno.	Manejo de nutrientes y/o del agua
Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH ₄ ⁺ -N, NO ₃ ⁻ -N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China	Cuenca del lago Erhai	Parcela experimental	Uso de 8 diversos tipos de fertilizantes (orgánico, urea, etc) para revisar la pérdida de nitrógeno en un cultivo de arroz	Manejo de nutrientes y/o del agua
Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat	15 parcelas de 8x7 m	Parcela experimental	Realizar rotación de arroz de verano y trigo de invierno con	Manejo de nutrientes y/o del agua

rotation by improving fertilizer management			fertilizantes químicos c200, c300 y orgánicos.	
Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields	12 parcelas de aprox. 35m ²	Parcela experimental	Fertilización controlada y riego de ahorro de agua	Manejo de nutrientes y/o del agua
Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (Persea americana Mill.)	Marco de plantación 10x10 m	Parcela experimental	Fertilización localizado usando riego controlado con micro riego para riego	Manejo de nutrientes y/o del agua
Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management	18 parcelas con 80.4 m ² (12 m × 6.7 m) por parcela	Parcela experimental	Combinación fertilizantes orgánico y sintético	Manejo de nutrientes y/o del agua
Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system		Parcela experimental	Optimización de la gestión del agua y el nitrógeno	Manejo de nutrientes y/o del agua
Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation	12 parcelas de 2 X 3 m	Lisímetro	Combinación fertilizante orgánico y úrea	Manejo de nutrientes y/o del agua

Natural and NH ₄ ⁺ -enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy)	6 ha	Parcela experimental	Uso de zeolita como enmienda	Uso de enmiendas
Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study	4.5x7 m	Parcela experimental	Uso de biocarbón como enmienda	Uso de enmiendas
Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil	10x4 m	Parcela experimental	Aplicación de nitrógeno en 3 niveles diferentes en conjunto con zeolitas	Uso de enmiendas
Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield	4.4x5 m	Parcela experimental	Implementación de biocarbón en conjunto de fertilizantes sintéticos	Uso de enmiendas
Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching	7x3 y se crearon 24 parcelas	Parcela experimental	Aplicación de estiércol avícola y compost	Uso de enmiendas
Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile	250 m ²	Parcela experimental	Uso de fertilizante orgánico	Uso de enmiendas

Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania		Maceta	Uso de biocarbón como enmienda	Uso de enmiendas
Nitrogen Dynamics of Strawberry Cultivation in Vermicompost-Amended Systems	Maceta de 1 galón/144	Maceta	Uso de vermicompost como enmienda	Uso de enmiendas
Biochar Effects on Mineral Nitrogen Leaching, Moisture Content, and Evapotranspiration after N-15 Urea Fertilization for Vegetable Crop	9 columnas rellenas	Maceta	Aplicación de urea y/o biocarbón para mejorar las pérdidas de nitrógeno	Uso de enmiendas
Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field	12 lisímetros de 5 m ² (2.5 x 2 m)	Lisímetro	Uso de biocarbón como enmienda y riego controlado	Uso de enmiendas
Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada	24 parcelas experimentales, cada una de las cuales medía 100 m ²	Maceta	Suelo enmendado con estiércol líquido de cerdo	Uso de enmiendas
Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field		Parcela experimental	Manejo del riego en el uso de biocarbón como enmienda	Uso de enmiendas
Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield	Columnas de PVC de 23.5 cm de diámetro, 60 cm de profundidad y	Maceta	Enmienda de zeolita para mejorar propiedades del compostaje de residuos sólidos urbanos	Uso de enmiendas

	un drenaje en el fondo			
Cropping system and type of pig manure affect nitrate-nitrogen leaching in a sandy loam soil		Lisímetro	Uso de estiércol de cerdo como enmienda	Uso de enmiendas
Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle manure and mineral nitrogen fertiliser		Parcela experimental	Suelo enmendado con estiércol bovino y fertilizante nitrogenado mineral	Uso de enmiendas
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	12 parcelas divididas en bloques al azar. Cada parcela con 32m ² (8mx4m)	Parcela experimental	Uso de fertilizante a base de biocarbón	Uso de enmiendas
Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff	8 parcelas de 11m de largo y 3.5 de ancho, con un área total de 38.5m ²	Parcela experimental	Uso de estiércol líquido de cerdo como enmienda	Uso de enmiendas

Tabla C7.*Características de la estrategia implementada en los estudios*

Artículo	Cultivo(s) evaluado(s)	Fertilizante empleado	Duración del estudio	Método de análisis estadístico
Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (<i>Oryza sativa</i> L.) production	Arroz	Fertilizante orgánico (6.750 kg-ha-1, entre los cuales N \geq 1.63%, P ₂ O ₅ \geq 3.53%, K ₂ O \geq 1.92% y materia orgánica \geq 46%)	4 meses	ANOVA
Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation	Papa	Fertilizante en cantidades de 500 kg N/hm ² y 1000 kg N/hm ²	16 meses	
Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH ₄ ⁺ -N, NO ₃ ⁻ -N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China	Arroz	Fertilizante orgánico refinado y Urea convencional	1 año	ANOVA
Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management	Rotación Arroz-Trigo	Fertilizantes químicos c200, c300 y orgánicos.	3 años	ANOVA

Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields	Arroz	Urea recubierta de azufre. Se utilizó fósforo (P ₂ O ₅) y fertilizante potásico (K ₂ O)	2 años	
Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.)	Aguacate		4 años	ANOVA
Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice–wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management	Rotación Arroz-Trigo	Contenido de materia orgánica del 45.07%, un contenido total de N del 1.86%, contenido de fósforo total del 3.11%, contenido de potasio total del 0.85%, y el contenido de agua del 36.2%. En tratamiento CRU, se utilizó una urea recubierta de resina que contenía un 43% de N. Urea. Para todos los tratamientos	3 años	ANOVA
Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system	Arroz	potasio (135 kg K ₂ O ha ⁻¹ como cloruro de potasio) y fósforo (45 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ como superfosfato de calcio)	1 año	ANOVA
Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation	Arroz	Urea, el estiércol utilizado en el experimento era de residuos avícolas, que contenía 16.6 g de N, 15.1 g de P, 11.9 g de K y 519.7 g de materia orgánica por kilogramo. Además, en las parcelas CT se aplicó superfosfato de calcio (90 kg P ₂ O ₅ /ha) y cloruro de potasio (60 kg K ₂ O/ha)	2 años	ANOVA

Natural and NH ₄ ⁺ -enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy)	Rotación sorgo, maíz, trigo		3 años	
Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study	Rotación maíz, trigo		4 años	ANOVA
Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil	Canola		1 año	ANOVA
Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield	Algodón	Fertilizantes sintéticos	3 años	ANOVA
Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching	Frambuesa	Estiércol de ave y compost	7 años	
Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile	Lechuga	Fertilizantes orgánicos y sintéticas	1 año	ANOVA
Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania	Maíz		3 meses	ANOVA

Nitrogen Dynamics of Strawberry Cultivation in Vermicompost-Amended Systems	Tapones de fresa	Vermicompost y fertilizante sintético	4 meses	ANOVA
Biochar Effects on Mineral Nitrogen Leaching, Moisture Content, and Evapotranspiration after N-15 Urea Fertilization for Vegetable Crop	Hortalizas	Urea	6 meses	ANOVA
Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field	Arroz	Fertilizante compuesto N:P2O5:K2O ¼ 16%:12%:17% y urea TN 46.2%.	3 años	
Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada	Trigo		3 años	
Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field	Cebolla	Urea y nitrato de amonio	3 años	
Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield	Maíz		4 meses	ANOVA
Cropping system and type of pig manure affect nitrate-nitrogen leaching in a sandy loam soil	Rotación canola-cebada	Urea, estiércol de cerdo líquido y sólido, uno a base de fósforo y otro a base de nitrógeno.	3 años	ANOVA
Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle	Rotación tomate-canola	Nitrato de amonio (34.5% N).	2 años	ANOVA

manure and mineral nitrogen fertiliser			
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	Espinaca		3 meses
Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff	Soya		2 años
			ANOVA

Tabla C8.*Formas de pérdidas de nitrógeno de los estudios*

Artículo	Formas de pérdida de nitrógeno medidas		
	Lixiviación	Escorrentía	Volatilización
Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (<i>Oryza sativa</i> L.) production	X	X	
Mechanisms underlying nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from potato fields under drip irrigation and furrow irrigation	X		
Application of Optimum N Through Different Fertilizers Alleviate NH ₄ ⁺ -N, NO ₃ -N and Total Nitrogen Losses in the Surface Runoff and Leached Water and Improve Nitrogen Use Efficiency of Rice Crop in Erhai Lake Basin, China	X	X	
Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management		X	
Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields	X		X
Lixiviación de nitratos y condición nutrimental en dos sistemas de manejo de riego y nutricional de aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.)	X		
Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management	X	X	X
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	X	X	X

Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation	X	X	X
Natural and NH ₄ ⁺ -enriched zeolite amendment effects on nitrate leaching from a reclaimed agricultural soil (Ferrara Province, Italy)	X		
Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study	X		
Zeolite influences on nitrate leaching, nitrogen-use efficiency, yield and yield components of canola in sandy soil	X		
Biochar derived from corn straw affected availability and distribution of soil nutrients and cotton yield	X		
Compost and poultry manure as preplant soil amendments for red raspberry: Comparative effects on root lesion nematodes, soil quality and risk of nitrate leaching	X		
Comparing nitrate leaching in lettuce crops cultivated under agroecological, transition, and conventional agricultural management in central Chile	X		
Effect of organic amendments on nitrate leaching mitigation in a sandy loam soil of Shkodra district, Albania	X		
Nitrogen Dynamics of Strawberry Cultivation in Vermicompost-Amended Systems	X		
Biochar Effects on Mineral Nitrogen Leaching, Moisture Content, and Evapotranspiration after N-15 Urea Fertilization for Vegetable Crop	X		
Biochar as a tool to reduce environmental impacts of nitrogen loss in water-saving irrigation paddy field	X		X

Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status, nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of western Canada	X	
Nitrogen dynamics affected by biochar and irrigation level in an onion field	X	X
Composts Containing Natural and Mg-Modified Zeolite: The Effect on Nitrate Leaching, Drainage Water, and Yield	X	
Cropping system and type of pig manure affect nitrate-nitrogen leaching in a sandy loam soil	X	X
Nitrogen leakages and vegetable dry matter yield in a subtropical wetland soil amended with cattle manure and mineral nitrogen fertiliser	X	
Effects of biochar-based fertilizer on nitrogen use efficiency and nitrogen losses via leaching and ammonia volatilization from an open vegetable field	X	X
Impacts of Pig Slurry Applied to Two Different Soils on Nutrient Transport by Runoff	X	X

Apéndice D. Gráfica de frecuencia de implementación de estrategias para reducir pérdidas de nitrógeno en los artículos seleccionados

