



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO EFICIENTE DE
FERTILIZANTES-N EN LA AGRICULTURA Y SU
APLICABILIDAD AL TERRITORIO COLOMBIANO**

JENNY PAOLA PARRA CAÑAS

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Posgrados Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2020**



**NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO EFICIENTE DE
FERTILIZANTES-N EN LA AGRICULTURA Y SU APLICABILIDAD AL
TERRITORIO COLOMBIANO**

JENNY PAOLA PARRA CAÑAS

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Gestión Ambiental

Asesor:

LUIS ARIEL TREJOS MELCHOR
Ingeniero Sanitario
Especialista en Gestión Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingenierías, Posgrados, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia

2020

CONTENIDO

	Pág.
2. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 Objetivo general	5
1.4 Objetivos específicos.....	5
2. MARCO TEÓRICO	5
3. EFECTOS DE FERTILIZANTES NITROGENADOS SOBRE EL RECURSO HIDRICO.	15
4. LINEAS TECNOLÓGICAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL USO DE NUTRIENTES NITROGENADOS NUE	19
4.1 Agricultura de precisión.	20
4.2 Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados SCRSF	23
4.2 Uso de microorganismos promotores del crecimiento en plantas-PGPM.....	29
4.3 Uso de nanofertilizantes para el uso eficiente del nitrógeno	34
4.5 Mejora genética en plantas para el uso eficiente de los nutrientes.....	39
4.6. Tecnologías para el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura colombiana.	43
5. METODOLOGÍA	48
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	50
7. CONCLUSIONES.....	53
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A. Resumen tecnologías para mejorar el NUE de FN y su aplicabilidad en territorio colombiano.	58

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Carga de nitrógeno amoniacal N-NH ₃ y oxígeno disuelto	18
Tabla 2. Microbios fijadores de nitrógeno simbióticos de vida libre y asociativos y sus principales beneficios.	31
Tabla 3. Composición de los nanofertilizantes-N, propiedades, métodos de aplicación y su efecto en cultivos	38
Tabla 4. Tecnologías para el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura colombiana.	43

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Clasificación de fuentes hídricas.	6
Ilustración 2. Distribución de tipos de punto de agua y su condición a nivel nacional.	7
Ilustración 3. Distribución por área hidrográfica de la oferta total.	8
Ilustración 4. Ciclo de nitrógeno.	10
Ilustración 5. Interacción entre el nitrógeno-N aplicado y el proceso de pérdida.	11
Ilustración 6. Modo de contaminación a fuentes hídricas por nitratos y nitritos.	12
Ilustración 7. Consumo de fertilizantes Kg/ha de tierras cultivables, Colombia, Brasil, China, Ecuador, Estados unidos.	13
Ilustración 8. Consumo de fertilizantes en Colombia.	14
Ilustración 9. Solubilidad de fertilizantes nitrogenados-FN convencionales y su consumo en Colombia.	14
Ilustración 10. Cargas contaminantes de DQO, DBO5, nitrato, nitrógeno amoniacal y fósforo total. Calculada por estación de monitoreo.	17
Ilustración 11. Sitio experimental y diagrama esquemático de la configuración de recolección de escorrentía superficial.	22
Ilustración 12. Pérdidas de (N) por escorrentía año 2018 (A), 2019 (B).	22
Ilustración 13. Cantidad relativa de fertilizante disponible durante el periodo de crecimiento.	24
Ilustración 14. Estructura y modo de acción de los fertilizantes de liberación lenta SRF ...	25
Ilustración 15. Comportamiento de liberación de urea, SRF sin HNT y SRF con HNT en agua destilada (a) y en suelo (b).	26
Ilustración 16. Aplicación de las bolsas de liberación lenta cargadas de urea en un cultivo de durazno.	28
Ilustración 17. Microbiomas de plantas y suelos con múltiples atributos que promueven el crecimiento de las plantas como biofertilizantes para PGP y fertilidad del suelo en condiciones naturales y estresadas.	30
Ilustración 18. Aplicación de nanopartículas NPs y su respuesta en plantas.	35
Ilustración 19. Fertilizantes nano-activados para controlar la liberación y la eficiencia de uso de los nutrientes nitrogenados.	37
Ilustración 20. Clase de modificación genética, según la procedencia del gen de interés. ..	40
Ilustración 21. Diferencia entre mejoramiento convencional y la ingeniería genética	41
Ilustración 22. Esquema metodológico para la revisión de Nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes-N en la agricultura y su aplicabilidad al territorio colombiano	48

GLOSARIO

- ADN.** Ácido desoxirribonucleico.
- ALC.** América Latina y el Caribe.
- BNF.** Biofertilizantes fijadores de Nitrógeno.
- CEPAL.** Comisión Económica para América Latina y el Caribe
- ENA.** Estudio Nacional del Agua.
- FAO.** Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FN.** fertilizantes Nitrogenados.
- GEI.** gases de efecto invernadero.
- IARC.** Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer.
- ICA.** Instituto Colombiano Agropecuario
- ICA.** Instituto Colombiano Agropecuario.
- IDEAM.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IFA.** International Fertilizer Association.
- IICA.** Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- MGP.** Modificación genética en plantas.
- N.** Nitrógeno.
- NPBT.** Nuevas técnicas de fitomejoramiento.
- NPK.** Fertilizantes a base de los elementos químicos Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).
- NPs.** Nanopartículas.
- NT.** Carga total neta de nitrógeno.
- NUE.** Uso eficiente de nitrógeno.
- OCDE.** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- OGM.** Organismo genéticamente modificado.
- OHTS.** oferta hídrica total superficial.
- OMS.** Organización Mundial de la Salud.
- ON.** Nitrógeno Orgánico.
- ONU.** Organización de las Naciones Unidas.
- PGPM.** Microorganismos promotores de crecimiento de las plantas.
- RH.** Recursos hídricos.
- SCRSF.** Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados.
- SRF.** Fertilizantes de liberación lenta.
- UNESCO.** Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la ciencia y la Cultura.
- WWAP.** Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos.

RESUMEN

La presente monografía identifica nuevas tecnologías orientadas al mejoramiento de la eficiencia de fertilizantes nitrogenados en cultivos agrícolas, en aras de disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía a fuentes de agua superficiales y subterráneas. Las tecnologías estudiadas comprendieron la agricultura de precisión, los Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados-SCRSF, los nanofertilizantes, los biofertilizantes como fijadores de N y el mejoramiento genético en plantas-GMP, identificando su beneficio sobre el uso eficiente del nitrógeno- NUE y su impacto sobre el recurso hídrico-RH; así como su aplicabilidad en la agricultura colombiana.

Después de evaluar la información se determinó que los usos de estas tecnologías en la agricultura colombiana ayudarían a mitigar la contaminación de fuentes superficiales y subterráneas por nitratos $[\text{NO}_3^-]$, al disminuir las pérdidas de nitrógeno-N en el agua; sin embargo, se resalta la necesidad del desarrollo de nuevas investigaciones sobre la aplicabilidad de estas tecnologías en cultivos de gran importancia para la seguridad alimentaria, así como políticas que regulen su uso; en especial en el área de nanoagricultura y mejoramiento genético, pues aún no se ha determinado el efecto que podrían tener sobre el medio ambiente y la salud humana. De igual manera se encontró una baja cobertura de monitoreo de la calidad de agua superficial y un nulo monitoreo en aguas subterráneas imposibilitando medir el impacto que tiene el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados sobre este RH primordial para el abastecimiento de población rural del país.

Palabras claves: Recurso hídrico, nanoagricultura, mejoramiento genético, fertilización controlada, nitrógeno.

ABSTRACT

This monograph identifies new technologies aimed at improving the efficiency of nitrogen fertilizers in agricultural crops, in order to reduce nutrient losses through leaching and runoff to surface and groundwater sources. The technologies studied included precision agriculture, slow release, controlled and stabilized fertilizers-SCRSF, nanofertilizers, biofertilizers as N fixers and genetic improvement in plants-GMP, identifying their benefit on the efficient use of nitrogen-NUE and their impact on water resources-RH; as well as their applicability in Colombian agriculture.

After evaluating the information, it was determined that the uses of these technologies in Colombian agriculture would help mitigate the contamination of surface and underground sources by nitrates [NO₃-], by reducing the losses of nitrogen-N in water; however, the need to develop new research on the applicability of these technologies in crops of great importance for food security, as well as policies that regulate their use, especially in the area of nanoagriculture and genetic improvement, has not yet been determined, since the effect that they could have on the environment and human health has not been determined. Similarly, it was found a low coverage of surface water quality monitoring and no monitoring in groundwater, making it impossible to measure the impact that the indiscriminate use of nitrogen fertilizers has on this primordial HR for the supply of the country's rural population.

Keywords: Water resource, nanoagriculture, nitrogen genetic improvement, controlled fertilization.

2. INTRODUCCIÓN

La investigación de nuevas tecnologías para disminuir las pérdidas de nutrientes nitrogenados al medio ambiente se ha venido incrementando en los últimos años; en miras a disminuir problemas ambientales como la eutrofización, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas y la producción de gases de efecto invernadero-GEI, por la emisión de óxido nitroso (N₂O) (Cui, y otros, 2020); (Kour, y otros, 2020); (Lyua, y otros, 2019); (Xiao, y otros, 2019); (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018).

Con mira en una producción limpia, es decir que mejore el rendimiento de fertilizantes-N, pues en la actualidad su porcentaje de absorción se encuentra entre 30% y 35%, (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018), lo que significa una pérdida de N de más del 65%; debido a la baja eficiencia en el uso de nutrientes-NUE (capacidad de las plantas para adquirir nutrientes y transportarlo a las raíces, las que los movilizan a otras partes de la planta) de los cultivos, lo cual no solo aumenta los costos de producción, sino que ayuda a la destrucción del medio ambiente agroecológico. (Wei, Wang, Chu, & Li, 2019). Según el informe de la calidad del agua de la UNESCO 2018 el aprovechamiento del potencial de la bioeconomía para incrementar la contribución de la agricultura al desarrollo económico debe afrontar desafíos de innovación que aumenten la productividad y la eficiencia agrícola en un contexto sostenible (WWAP & ONU, 2018).

Por esta razón la presente monografía de revisión “*Nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes-n en la agricultura y su aplicabilidad al territorio colombiano*” tiene como objetivo identificar nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia en la aplicación de fertilizantes nitrogenados en cultivos agrícolas disminuyendo así las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía a fuentes de agua superficiales y subterráneas, que permitan dar respuesta a los siguientes interrogantes: ¿Cómo afecta las pérdidas de fertilizantes nitrogenados la calidad del recurso hídrico?, ¿existen tecnologías que permitan un uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados, disminuyendo así las pérdidas a fuentes de agua? ¿Qué tan cerca se encuentran estas tecnologías de la agricultura colombiana?

1.1 Planteamiento del problema

Según el Glosario Hidrológico Internacional de la UNESCO, se definen “*los recursos hídricos-RH como los recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un periodo de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable*” (Organización Meteorológica Mundial, 2012, pág. 685); pero este indispensable recurso es sobreexplotado y contaminado por la agricultura que demanda aproximadamente el 70% de las extracciones de agua a nivel mundial, de las cuales la gran mayoría se utilizan para el riego (WWAP & ONU, 2018). Según el Estudio Nacional del Agua- ENA 2018 para el año 2016 la demanda de agua para 20 zonas hidrográficas de Colombia fue de 44,4%; así mismo la agricultura es responsable del vertido de químicos, materia orgánica, desechos, sedimentos y sales; la carga total neta de nitrógeno NT vertida en las fuentes superficiales Colombianas para el año 2016 fue de 144.989 Ton/año, de las cuales el 74% proviene de la industria, y el 26% del sector doméstico (IDEAM, 2019).

Según el informe sobre las Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020 ((CEPAL), (FAO), & (IICA), 2019), el crecimiento poblacional mundial para la próxima década será de un 1% anual presentando una desaceleración en comparación con la tasa anual de 1,4% en la década de los 90's y de 1,2% en los años 2000; pero en regiones con ingresos bajos la tasa de expansión podrá ser superior al 1%, para suplir esta tasa en el mismo informe se proyecta un aumento de por lo menos 100 millones de hectáreas para uso agrícola en el 2050 que representa un incremento de 2% con respecto a las hectáreas sembradas para el 2012 y un aumento de la producción en cerca de 1.3 % al año en la próxima década, dando respuesta al aumento en la demanda de alimentos que se estima será un 60% mayor para el 2050 (WWAP & ONU, 2018), esto conllevará a una expansión de las fronteras agrícolas, aumentando en forma proporcional la perturbación mecánica del suelo, el consumo de insumos como agua, energía y agroquímicos.

Los fertilizantes convencionales pueden ser químicos u orgánicos, ellos ayudan a satisfacer la demanda mundial de alimentos, al aumentar los rendimientos de productos agrícolas por hectáreas cultivadas (Lu, y otros, 2019); sin embargo la aplicación excesiva e intensiva de fertilizantes-N (Ongley, 1997), se asocia a problemas ambientales como la eutrofización la cual se produce en forma natural y consiste en el proceso de cambio de un estado trófico a otro de nivel superior por adición de nutrientes; pero las actividades como la agricultura hacen que exista un desequilibrio entre los nutrientes producidos y los absorbidos, causando su acumulación en el medio ambiente acuático generado por escorrentía y lixiviación de compuestos de nitrógeno y fosfato que afecta el crecimiento de los ecosistemas (Florindo, Bom, Favarini, & Troller, 2020); siendo uno de los efectos visibles el color verde en el agua superficial, producto del crecimiento masivo de microalgas, algunas de las cuales producen toxinas que afectan tanto a la ictiofauna como a los seres humanos (Luna & Sergio, 2014).

Los fertilizantes nitrogenados también pueden llegar hasta aguas subterráneas por procesos de infiltración de nutrientes nitrogenados que no son absorbidos por los cultivos, la presencia de concentraciones de nitratos en aguas superficiales y subterráneas que superen el estándar de calidad de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el agua potable de 50 mg/L de $\text{NO}_3\text{-N}$, (Lu, y otros, 2019) representando un riesgo para la salud, especialmente en recién nacidos puede causar el “síndrome del bebé azul” o metahemoglobinemia, que inhibe el transporte de oxígeno en la sangre, pudiendo incluso causar la muerte (ATSDR, 2015).

En Colombia el uso de fertilizantes ha venido creciendo, según Instituto Colombiano Agropecuario-ICA para el año 2017 su demanda fue de 3.300.455 Ton/año en estado sólido y 9.314 L/año en estado líquido; Pese al registro de estas cifras y al conocimiento de su impacto sobre los RH superficiales y subterráneos, en el último Estudio Nacional del Agua-ENA realizado en el 2018, se presenta un análisis de la demanda potencial de agroquímicos en Colombia para el sector agrícola realizados en los años 2008, 2012 y 2016, encontrándose un aumento de 24 % en el uso de fertilizantes en litros y 95 % de fertilizantes en toneladas, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales- (IDEAM, 2019). Para el caso de fertilizantes N, se señala que la eficiencia de su empleo oscila entre 10% y 60% de acuerdo con el tipo de fertilizante, el cultivo y del agrosistema de producción, representando solo un daño en el recurso hídrico si no una pérdida económica para el agricultor (Lira, Menézas, De los Santos, & Vera, 2018).

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA ((CEPAL), (FAO), & (IICA), 2019, pág. 38), en el capítulo: Acciones claves para la transformación rural y agrícola hacia el desarrollo sostenible e inclusivo en América Latina y el Caribe-ALC las problemáticas ambientales como el cambio climático entre ellas las sequías, las cuales provocan conflictos sociales por la accesibilidad al RH y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria de las poblaciones, se hace indispensable que las miradas a futuro, sean dirigidas a la búsqueda de una agricultura más sostenible, que permita contribuir a la preservación de este líquido vital, cumpliendo así con uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030 (ODS 12: consumo y producción responsable).

Ante este horizonte se requieren nuevas tecnologías que permitan incrementar el uso eficiente de los fertilizantes-N. Además, la restringida disponibilidad del recurso agua y suelo exige a que la agricultura convencional sea más eficiente y productiva usando tecnologías modernas. Debido al limitado crecimiento y expansión de la tierra arable, así como del uso de agua para riego en todo el mundo, es prioritario ocuparse en el desarrollo de la agricultura sustentable y el incremento en el uso eficiente de los agroinsumos, reduciendo o minimizando el daño a los ecosistemas como el de aguas superficiales (Lira, Menézas, De los Santos, & Vera, 2018)

1.2 OBJETIVOS

1.3 Objetivo general

Identificar nuevas tecnologías de aplicación de fertilizantes nitrogenados que mejoren la eficiencia de absorción en cultivos agrícolas, disminuyendo así las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía a fuentes de agua superficiales y subterráneas.

1.4 Objetivos específicos:

Identificar los efectos que traen las pérdidas por lixiviación y escorrentía de nutrientes nitrogenados sobre el recurso hídrico.

Determinar cuáles de las tecnologías encontradas han sido exitosas en la aplicación fertilizantes nitrogenados.

Evaluar la aplicabilidad de las nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura colombiana.

2. MARCO TEÓRICO

Concibiendo la **HIDROLOGIA** como la ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico e influencia en las actividades humanas (WWAP & ONU, 2018).

La reserva del agua subterránea está limitada por la recarga de los acuíferos, proveniente de una parte del agua lluvia precipitada, la cual llega al suelo y escurre por él en forma de escorrentía, mientras que otra parte lo penetra a través de los poros y fisuras de las rocas hacia el subsuelo. Este proceso se conoce como infiltración y depende de la interacción de una serie de factores que determinan que la cantidad de agua infiltrada pueda variar ampliamente de unas regiones a otras. (IDEAM, 2019, pág. 132).

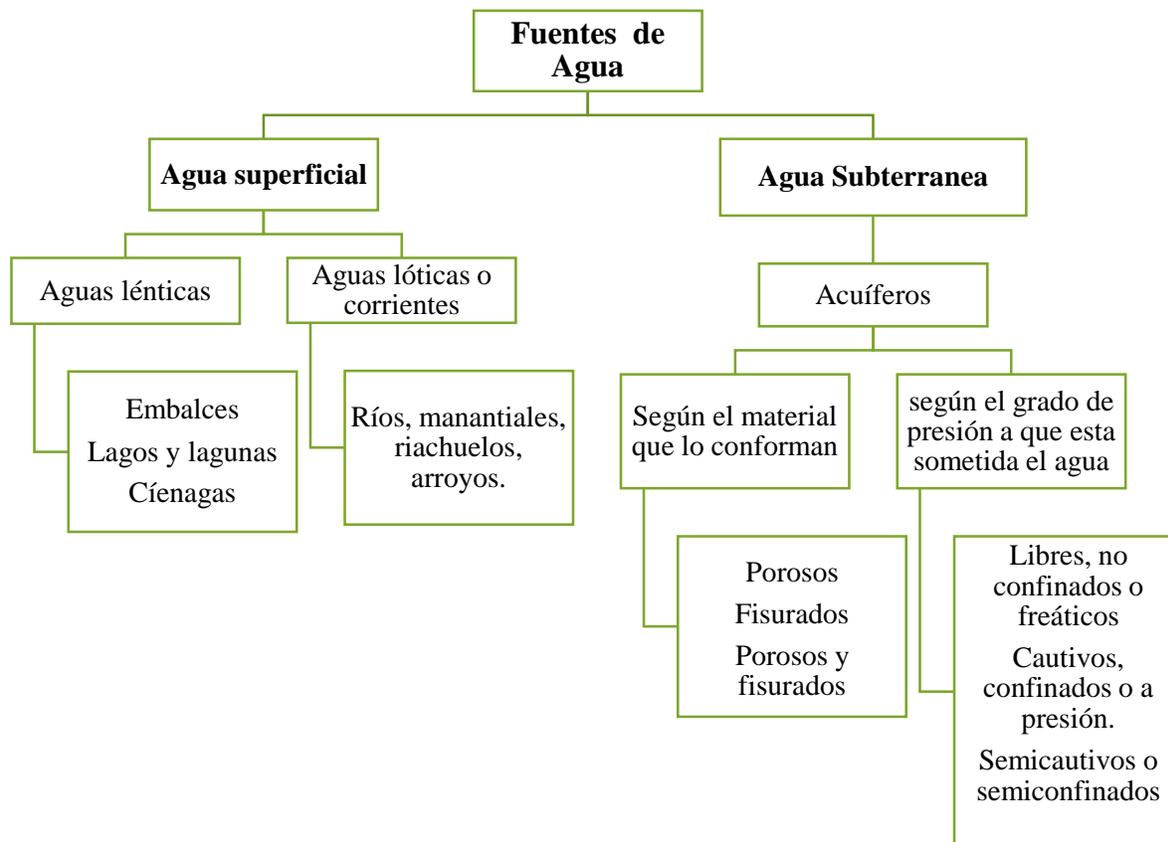


Ilustración 1. Clasificación de fuentes hídricas.

Fuente: Elaboración propia información tomada de (WWAP & ONU, 2018)

El agua que llega hasta el subsuelo forma los acuíferos; unidades de roca o sedimentos compuestos de material permeable, capaces de almacenar y transmitir cierta cantidad de agua. Considerando su comportamiento hidráulico, así como su posición estructural, se pueden clasificar en acuíferos libres, confinados o semiconfinados (ilustración 1). El sistema acuífero, por otro lado, corresponde a un “dominio espacial, limitado en superficie y en profundidad, en el que existen uno o varios acuíferos, relacionados o no entre sí, pero que constituyen una unidad práctica para la investigación o explotación” En el Estudio Nacional del Agua-ENA 2014 se identificaron y delimitaron 62 sistemas acuíferos en el territorio nacional colombiano, incluyendo cinco sistemas transfronterizos (IDEAM, 2019, pág. 133).

- **inventario nacional de puntos de agua subterránea**

De acuerdo con la metodología planteada por el ENA 2018 para la actualización del inventario nacional de puntos de agua, fueron consolidados un total de 64.196 puntos de agua por las autoridades ambientales. Estos puntos de agua fueron clasificados en el ENA 2018 (IDEAM, 2019) según la tipología del punto en; pozos, piezómetros, aljibes, manantiales, otros y sin información (registros que no cuentan con la información del tipo de punto), los cuales se distribuyen en el territorio, con un primer lugar los aljibes con un 57,06 % del total reportado, habitualmente con profundidades no mayores a los 40 m, le siguen los pozos profundos (26,24 %), los cuales alcanzan profundidades de 1 a 300 m generalmente (Ilustración 2); a nivel nacional se idéntica que el 31,0 % de los puntos es productivo, el 5,8 % se encuentra en reserva y sólo el 0,8 % son utilizados para monitoreo. (Ilustración 2). Sin embargo, se considera que el número total de puntos de agua subterránea reportados en el ENA 2018 se encuentra muy por debajo de la cantidad de puntos existentes a nivel nacional.

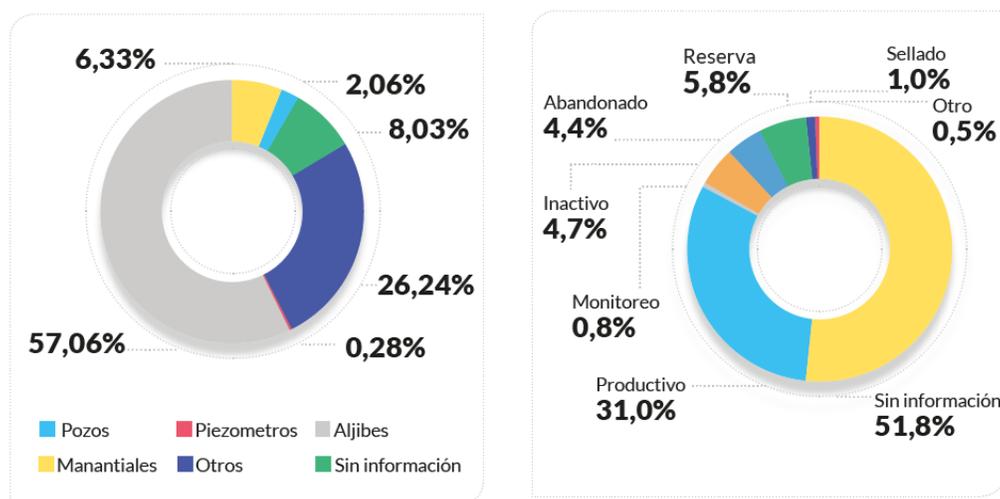


Ilustración 2. Distribución de tipos de punto de agua y su condición a nivel nacional.
Fuente: (IDEAM, 2019, pág. 157)

- **Agua superficial**

El agua dulce se mueve a diferentes velocidades por caminos establecidos que pueden variar en el tiempo; formando redes de arroyos y ríos en las cuencas hidrológicas, fluyendo por gravedad desde sus nacientes hasta el mar, abasteciendo a su paso a embalses,

lagos, lagunas, ciénagas, ríos, manantiales, riachuelos y arroyos, Quienes dependen de la escorrentía superficial que se ve afectada por factores como el clima (precipitaciones, temperatura, etc.), el relieve, la vegetación y la geología (factor generador a su vez de los suelos en función también del clima). (IDEAM, 2019)

- **La Oferta hídrica total superficial (OHTS)**

“Es el volumen de agua por cantidad de tiempo que escurre por la superficie y que no se infiltra o evapora. Además, hace parte del agua usada por ecosistemas y usuarios para desarrollar sus actividades vitales y económicas. La oferta hídrica puede expresarse de varias maneras, como, por ejemplo: i) en volumen (m³), ii) en escorrentía (mm), que corresponde al volumen que escurre superficialmente, pero expresado en lámina de agua en rendimiento, que es el volumen de agua evacuado por la cuenca en un intervalo de tiempo y en un área específica (l/s/km²), y su valor da un buen indicativo de la cantidad de escorrentía superficial que se da en una cuenca por unidad de área” (IDEAM, 2019, pág. 156)

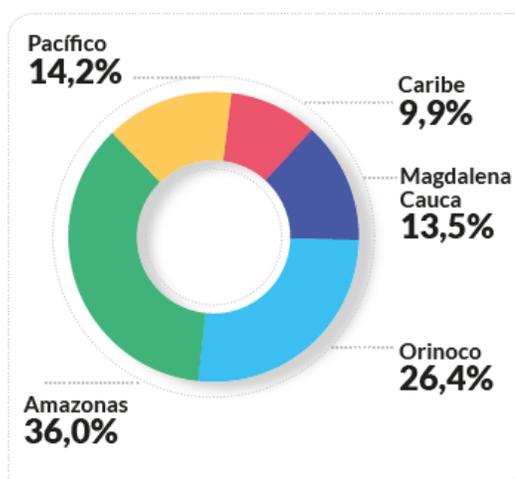


Ilustración 3. Distribución por área hidrográfica de la oferta total.
Fuente: (IDEAM, 2019, pág. 157)

Según el ENA 2018 la oferta total por área hidrográfica es en su orden de: 36,0% para el Amazonas con 728.247 m³; 26, 4% para el Orinoco con 533.843 m³; 14,2 % para el Pacífico con 287.405 m³; 13,5% para el Magdalena y Cauca con 273.338 y 9,9% para el Caribe con 200.280 m³; mostrando en general una disminución de un 5% en comparación con lo reportado en el ENA 2014 con excepción del área Caribe (ilustración 3) (IDEAM, 2019)

- **Ciclo acelerado del Nitrógeno**

Las moléculas del nitrógeno se mueven por procesos biológicos y no biológicos (o abióticos) de manera cíclica en la Tierra, y a esto se le llama ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Este ciclo comprende cinco procesos principales: 1. fijación, 2. asimilación, 3. amonificación, 4. nitrificación y 5. desnitrificación, (Ilustración 4). Siendo el proceso de nitrificación el que permite que las plantas asimilen el nitrógeno en forma de nitritos NO₂⁻ y nitratos NO₃⁻. Sin embargo, las actividades agrícolas liberan, por una parte, amoníaco (NH₃), óxido nitroso y óxido nítrico (N₂O y NO, respectivamente) que se van a la atmósfera y, por otra, nitratos (NO₃⁻) que por lixiviación llegan hasta los acuíferos considerados fuentes de abastecimiento de agua potable para la población; este ciclo acelerado del nitrógeno causa una acumulación en ecosistemas acuáticos provocando el fenómeno de Eutrofización (Moreno, S.F)

- **Interacciones entre el nitrógeno aplicado y los procesos de pérdida**

El uso de fertilizantes nitrogenado-FN es preciso para ofrecer el alto rendimiento en la producción de alimentos, pero la baja eficiencia en el uso del nitrógeno-NUE menor al 50%, causada por las pérdidas a través de nitrificación/denitrificación, volatilización de amonio, lixiviación de nitrato y escorrentía/erosión (ilustración 5), factores como el inadecuado manejo del riego, las aplicaciones excesivas y no oportuna de FN, las características del suelo y las condiciones climáticas están directamente relacionados con las pérdidas por escorrentías y lixiviación, de igual forma la pérdida de nitrato está en función de la fuente de fertilizante (orgánico o inorgánico) y de las fases fenológicas de las plantas, presentándose la mayor lixiviación en las primeras etapas. (Daza, Ladino, & Urrutia, 2018)

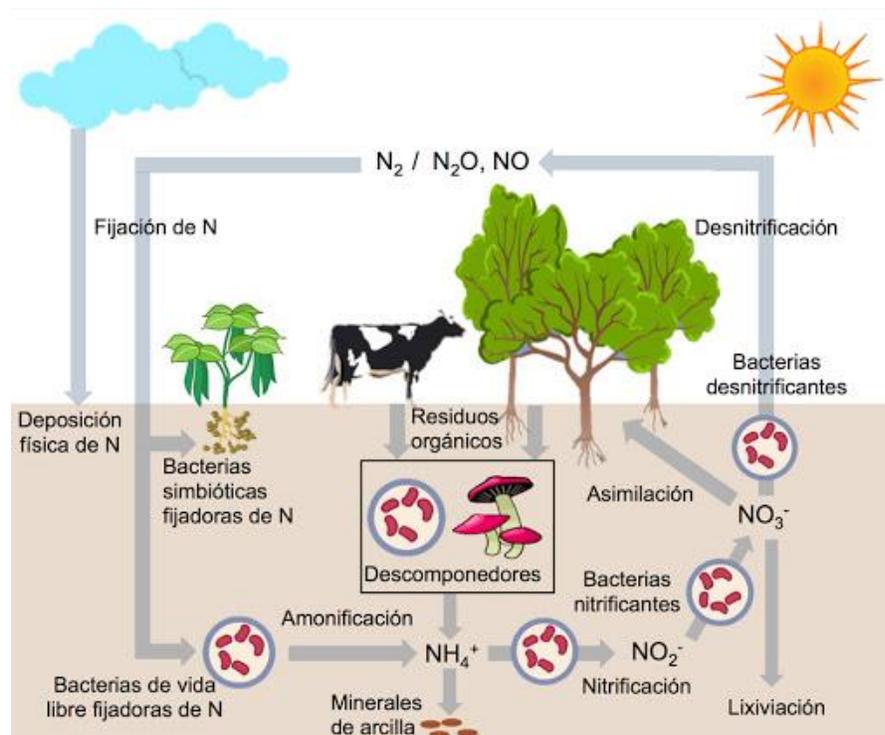


Ilustración 4. Ciclo de nitrógeno.

Fuente: (Moreno, S.F)

La inmovilización del nitrógeno-N en la materia orgánica del suelo, igualmente compite con la absorción y disminuye la inmediata disponibilidad del N para la planta. El N inmovilizado no se pierde del campo, permanece en el suelo hasta que la mineralización lo libera lentamente en formas disponibles para la planta. Como resultado parte de N aplicado es absorbido por cultivos en los años posteriores (Luc & Heffer, 2007).

- **Eutrofización**

La deposición de nitrógeno oxidado (NO_y) y nitrógeno reducido (NH_x) produce eutrofización de ecosistemas acuáticos. La eutrofización provoca floraciones de algas y plantas acuáticas, lo cual reduce el oxígeno (hipoxia) disponible en el agua, ocasionando la muerte de peces y otros organismos, con la consiguiente disminución de la biodiversidad del ecosistema. Estos compuestos también pueden acidificar el suelo, produciendo cambios en la composición de especies y la calidad del agua (Moreno, S.F).

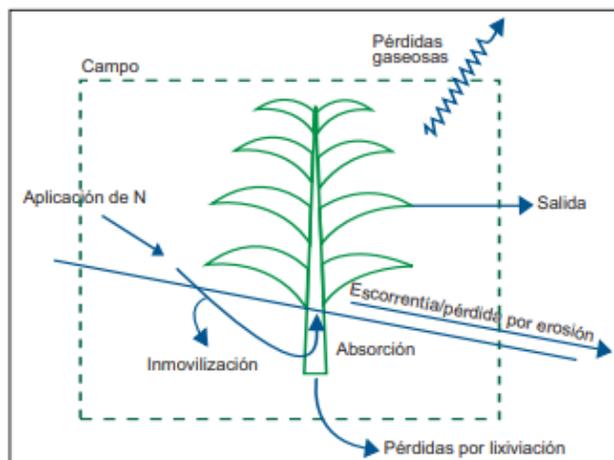


Ilustración 5. Interacción entre el nitrógeno-N aplicado y el proceso de pérdida.
Fuente: Tomado de (Luc & Heffer, 2007, pág. 4)

La eutrofización se produce en forma natural, consiste en el proceso de cambio de un estado trófico a otro de nivel superior por adición de nutrientes, pero las actividades como la agricultura hacen que exista un desequilibrio entre los nutrientes producidos y los absorbidos, causando su acumulación en el medio ambiente acuático generado por la lixiviación de compuestos de nitrógeno y fosfato que afecta el crecimiento de los ecosistemas (Florindo, Bom, Favarini, & Troller, 2020); siendo uno de los efectos visibles el color verde en el agua, producto del crecimiento masivo de microalgas, algunas de las cuales producen toxinas que afectan tanto a la ictiofauna como a los seres humanos (Luna & Sergio, 2014).

- **Calidad del agua**

La calidad del agua está dada por sus características físicas, químicas y biológicas, que se ven afectadas por los procesos de alteración relacionados con actividades antrópicas o naturales en las que se ven involucrados agentes contaminantes que son aportados al recurso hídrico (IDEAM, 2019). “Se estima que el 80% del total de las aguas residuales industriales y municipales se libera al medio ambiente sin ningún tratamiento previo, lo que resulta en un deterioro creciente de la calidad general del agua con impactos perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas”. La lixiviación del nitrógeno agrícola causa el aumento de NO_3^- en aguas subterráneas y superficiales, con riesgos para la salud humana

porque el agua que se considera potable queda contaminada. También provoca cambios en los sistemas acuáticos. (WWAP & ONU, 2018)

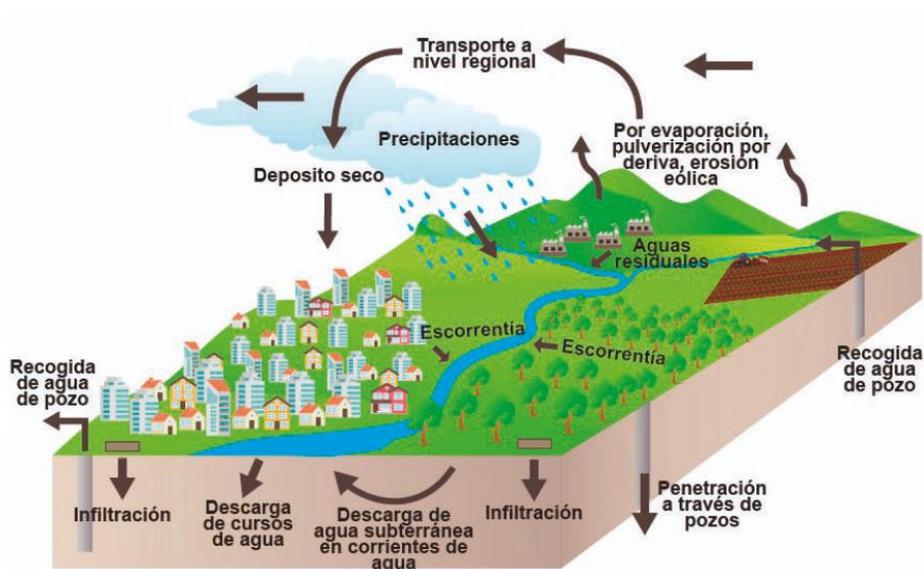


Ilustración 6. Modo de contaminación a fuentes hídricas por nitratos y nitritos.

Fuente: (IDEAM, 2019, pág. 157)

- **Carga contaminante por nitritos y nitratos**

La carga contaminante es una medida que representa la masa contaminante por unidad de tiempo que es vertida a un determinado sitio, se expresa en unidades de masa sobre tiempo Ton/año y/o día ó Kg/día. (IDEAM, 2019). Los fertilizantes-N generan una carga contaminante de nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) en aguas superficiales y subterráneas; según la Organización Mundial de la Salud-OMS la norma de calidad para el agua potable, estos valores no deben exceder de 50 mg de nitrato-N/L (Lu, y otros, 2019).

Los nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) se encuentra en forma natural en la superficie terrestre en rocas ígneas y volcánicas; el nitrato (NO_3^-) es el producto final de la descomposición de animales y vegetales y gracias al ciclo del nitrógeno llega a aguas y suelos. Por su parte las heces de los humanos y los animales son fuentes de amoníaco (NH_3) que por oxidación en ambientes aeróbicos se transforma en nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-) durante un proceso llamado nitrificación. Sin embargo, actividades humanas como la agricultura contribuyen al aumento de la concentración de los mismos en fuentes

hídricas, debido a aguas de escorrentía agrícolas (por uso de abonos químicos o animales) que por infiltración pueden llegar hasta los acuíferos (Ilustración 6) (ATSDR, 2015)

- **Fertilizantes nitrogenados con mayor demanda en Colombia**

Según los datos del Banco mundial de la FAO Colombia ha presentado un mayor consumo de fertilizantes por hectárea de tierras cultivadas en comparación con países como China, Estados Unidos, Brasil y Ecuador, con un máximo de consumo en el año 2012 de 805.791 Kg/ha cultivada.

Según el ENA 2018 el consumo de fertilizantes en estado sólido en Colombia (Ilustración 8) presento un comportamiento similar en promedio de 2.803.577 Ton/año, para los años de 2008, 2012 y 2016, en cuanto a los fertilizantes en estado líquido el consumo disminuyo en el año 2012 con 2.914.000 L/año, mientras que el año 2016 subió considerablemente con un consumo de 60.590.000 L/año (IDEAM, 2019). En América Latina, Colombia es el segundo país con el mayor consumo de FN, 5,8 veces por encima de la media regional de 84,2 kg·ha⁻¹ cultivable, superando a países como Chile, Brasil, México y Argentina (Daza, Ladino, & Urrutia, 2018)

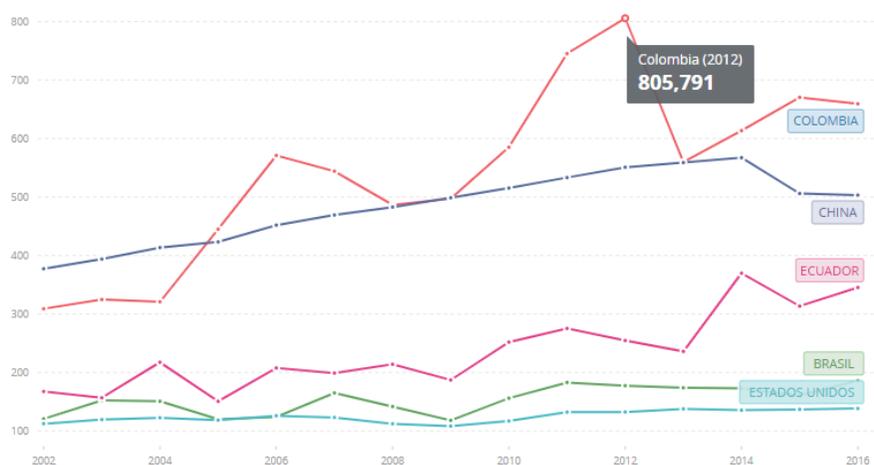


Ilustración 7. Consumo de fertilizantes Kg/ha de tierras cultivables, Colombia, Brasil, China, Ecuador, Estados Unidos.

Fuente: Datos banco mundial (FAO O. d., 2020)

Según el Boletín de comercialización de fertilizantes, las ventas de los FN convencionales durante el periodo de 2013-2016 (Ilustración 9), la urea tiene un comportamiento creciente CH_4NO_2 con un consumo máximo en el 2015 317.330 Ton en el año 2015 Ton, seguido está el sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ que para el mismo año presento su mayor consumo de 39.270 Ton (FAO O. d., 2020).

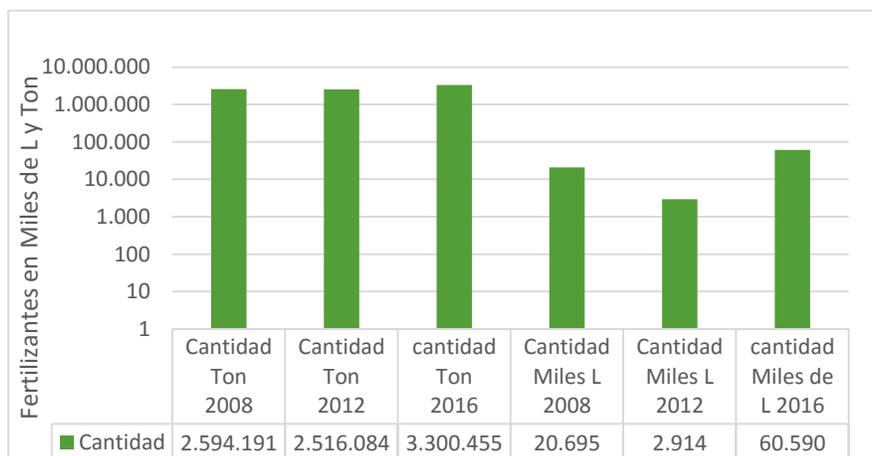


Ilustración 8. Consumo de fertilizantes en Colombia.

Fuente: adaptado de: (IDEAM, 2019, pág. 257)

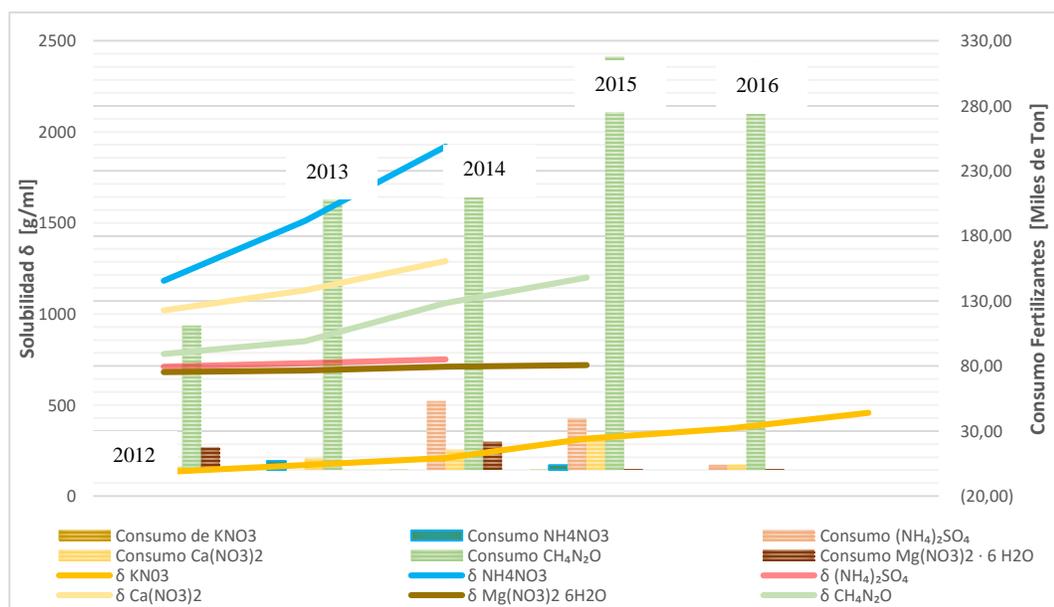


Ilustración 9. Solubilidad de fertilizantes nitrogenados-FN convencionales y su consumo en Colombia.

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de Boletín de comercialización de Fertilizantes años 2013-2016 (ICA, 2016) (SMART, S.F)

En cuanto a la solubilidad se observa su comportamiento creciente proporcional al aumento de la temperatura, siendo el nitrato de amonio NH_4NO_3 el FN más soluble en agua con 1920 g/L; sin embargo, su consumo es bajo en comparación con la urea que posee una solubilidad de 1060 g/L, dicha propiedad física facilita los procesos de pérdida de FN escorrentía y de lixiviación que causan daños al recurso hídrico. (SMART, S.F)

3. EFECTOS DE FERTILIZANTES NITROGENADOS SOBRE EL RECURSO HIDRICO.

El principal efecto de los FN sobre el recurso hídrico es la carga contaminante que se genera por los nitratos (NO_3^-) y nitritos (NO_2^-), que no son absorbidos por los cultivos, que por escorrentía agrícolas llegan a fuentes superficiales y por lixiviación hasta aguas subterráneas; causando daños en la población en su mayoría rural que se abastecen de aguas contaminadas con límites superiores a los establecidos por la OMS (50 mg/ L); según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasifico a estos iones como probables agentes cancerígenos para los humanos; La OMS concluye que “los compuestos N-nitrosos que son cancerígenos en especies animales probablemente también son cancerígenos en humanos, pero los datos de varios estudios epidemiológicos no muestran evidencia clara de esto” (Lu, y otros, 2019). Así mismo el nitrato presente en fuentes de agua ha sido asociado a la incidencia de metahemoglobinemia en niños y rumiantes, cáncer gástrico y otras enfermedades relacionadas con el sistema nervioso central. (Aguilar, 2014)

Otro de los efectos de los FN sobre aguas superficiales es que contribuye al fenómeno de la eutrofización, estos macronutrientes como el N que provienen de un uso excesivo en la agricultura, causando una alteración en los procesos biogeoquímicos del ciclo del N. Este cambio alteró el balance de nitrógeno entre la tierra, el agua y la atmósfera; causando una sobre población de algas que debido a su proceso fotosintético disminuye las concentraciones de oxígeno disuelto, provocando hipoxia en la ictiofauna. Este fenómeno se caracteriza por dar un color verde en el agua con olor a sedimentos con carga orgánica, así como un aumento en la alcalinidad del agua. (Kazakis, y otros, 2020)

La contaminación por nitratos NO_3^- de aguas subterráneas afecta esta reserva de agua potable primordial para todos los países. Además de las contaminaciones por NO_3^- se encuentran las contaminaciones asociadas a las floraciones de algas, (Decología.info, 2020) describe el proceso en el cual su toxicidad puede llegar a presentar condiciones anaerobias, que a su vez promueven el crecimiento de bacterias tóxicas, además agrega, sus consecuencias radican en un gran deterioro en la calidad y por ende la disminución del agua potable.

De igual manera el crecimiento denso de algas y bacterias fotosintéticas en aguas superficiales, afirma, pueden bloquear los sistemas hídricos, limitando la disponibilidad de agua corriente. De esta manera, las proliferaciones de algas tóxicas han cerrado diversos sistemas de suministro de agua en todo el mundo. Es el caso de Wuxi, China en 2007, en el que más de 2 millones de habitantes se quedaron sin acceso al recurso hídrico por tubería por más de una semana, debido a la alta concentración de estas en sus tuberías provenientes del lago Taihu.

En varias zonas, este recurso hídrico está contaminado hasta el punto de que ya no reúne las condiciones establecidas en las normas actuales para el consumo humano casi el 15% de las estaciones de monitoreo de aguas subterráneas en Europa registraron que el estándar para nitratos establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) era excesivo en el agua potable, además de que aproximadamente el 30% de los ríos y el 40% de los lagos se encontraban eutróficos o hipertróficos. (Kazakis, y otros, 2020, pág. 9)

En el Estudio Nacional del Agua 2018, se calculan cargas contaminantes que transportan los ríos a partir de datos de concentración y caudal, medidos en las estaciones y puntos de monitoreo de las subzonas hidrográficas en 2016, dentro de los índices de calidad medidos se encuentra el nitrato y nitrógeno amoniacal, para lo cual se clasificó la presión sobre la calidad del agua según su categoría, descriptores de presión, percentiles ajustados y percentiles de carga total de nitrógeno NT (Ton/año) de la siguiente forma: 1: Baja:

65%:127; 2: Moderada: 75%:214; 3: Media alta: 85%:440; 4: Alta: 95%:1977; 5: Muy alta:>95% > 1977.

La carga nitrógeno total neta vertida a las corrientes hídricas superficiales, por los tres sectores, en el año 2016 fue de 144.989 Ton/año. Del total de carga de NT neta vertida, la industria aportó el 74 % y el sector doméstico el 26 %. El 58 % de la carga de NT se concentró en ocho subzonas hidrográficas con aportes de 129 municipios, en las subzonas: río Bogotá, río Porce, arroyos directos al Caribe, ríos Lili, Meléndez y Cañaveralejo, directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura, río Pamplonita, río La Vieja, río Lebrija y otros directos al Magdalena, en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Cundinamarca, Bogotá D.C., Bolívar, Valle del Cauca, Cesar, Norte de Santander, Quindío, Risaralda y Santander (IDEAM, 2019, pág. 253)

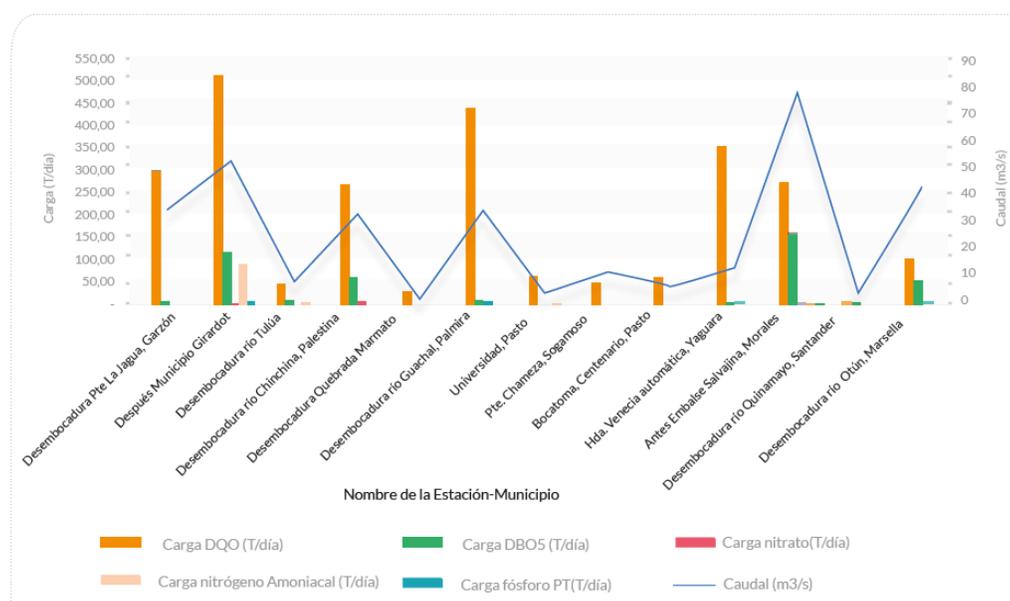


Ilustración 10. Cargas contaminantes de DQO, DBO5, nitrato, nitrógeno amoniacal y fósforo total. Calculada por estación de monitoreo.

Fuente: (IDEAM, 2019, pág. 226)

En la ilustración 10 se identifican estaciones con valores de cargas contaminantes altas que coinciden con puntos de monitoreo después de los vertimientos de aguas residuales

domésticas e industriales de zonas urbanas; los resultados de concentración y caudal para la carga de nitrato NO_3^- y nitrógeno amoniacal N-NH_3 encontrándose 0,1 y 7 t/día de NO_3^- 0,1 y 89 T/día de N-NH_3 y de caudal entre 0,11 y 77 m^3/s .

Tabla 1 Carga de nitrógeno amoniacal N-NH_3 y oxígeno disuelto

Área hidrográfica	Estaciones con monitoreo	Descripción general de la calidad del agua	Carga de Nitrógeno amoniacal <3,3 mg N-NH ₃ /L	Oxígeno disuelto > 3,0 mg O ₂ /L
Caribe	11 estaciones	se identificaron concentraciones que superan los niveles de referencia en 3 estaciones sobre el río Ranchería, encontrándose	No se describe	2,5
Magdalena-Cauca	87 estaciones La Campiña Alicachin el Salto Las Pilas	35 presentan concentraciones que superan los niveles de referencia establecidos para el análisis	16,67 26,33 y 20,00 49,00	1,87 0,00 y 1,60 0,00
Orinoco	4 estaciones	las concentraciones que generan una posible afectación de las condiciones de la calidad del agua frente a la variable sólidos suspendidos totales sobre las corrientes	No se describe	No se describe.
Pacífico	6 estaciones	En la estación Universidad, ubicada a la altura del municipio de Pasto.	17,23	2,9
Amazonas	No se describe	No se describe	No se describe	No se describe

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (IDEAM, 2019, pág. 227)

4. LINEAS TECNOLÓGICAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA EN EL USO DE NUTRIENTES NITROGENADOS NUE

Los fertilizantes nitrogenados-N son usados ampliamente en la agricultura, según (Ladha, Pathak, Krupnik, Six, & Kessel, 2005) el 50% de la población humana depende de estos para la producción de alimentos. En el mundo se utiliza cerca de 83 millones de toneladas métricas de N, lo que representa un aumento de aproximadamente 100 veces en los últimos 100 años. Se prevé que la demanda mundial de fertilizantes crezca ligeramente en 2017/18 y en 2018/19, y que alcance 199 millones de toneladas de nutrientes en 2022/23, habiendo sido de 187 millones de toneladas en 2017/1; el consumo mundial de fertilizantes aumentará un 1,3 % anual entre la media de los años 2015/16-2017/18 y 2022/23 (creciendo un % anual el de N, un 1,4% el de P y un 1,8% el de K). ((IFA), 2019)

En países como India, considerado en segundo país en producción y consumo en el mundo de nitrógeno los cultivos que consumen cerca de 70% de fertilizantes-N son arroz, trigo, maíz, caña, de azúcar y algodón. Se estima que la demanda y la oferta de N en India para 2030 sería de 23.45 y 18.76 Mt, respectivamente, dejando una brecha de 4.69 Mt. (Tewatia & Chanda, 2017)

Sin embargo, la disponibilidad de nitrógeno reactivo fijado por el uso de estos fertilizantes ha llevado a una acumulación significativa de N en la biosfera, por esto se hace importante el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados para minimizar sus consecuencias negativas a la vez que se maximiza sus beneficios como nutrientes en los cultivos y la producción de alimentos. (Rudek, Aneja, & Abrol, 2017). Con el objetivo de brindar una solución a esta problemática diferentes autores han desarrollado nuevas tecnologías que permitan disminuir pérdidas de nutrientes nitrogenados al medio ambiente, aumentando la productividad y la eficiencia agrícola en un contexto de uso sostenible de los recursos naturales, que contribuya al aprovechamiento del potencial de la bioeconomía para incrementar la contribución de la agricultura al desarrollo económico de la población en áreas rurales. (WWAP & ONU, 2018)

4.1 Agricultura de precisión.

La WWAP & ONU (2018 Pag. 62) describe las buenas prácticas agrícolas como cambios en el uso de las tierras para cultivo, las cuales pueden orientarse hacia el alcance de diversos resultados ambientales positivos. Describe entonces una gran variedad de buenas prácticas de gestión agrícolas, entre las que están los cultivos de coberturas, labranza de conservación, aplicación precisa de fertilizantes, eficiencia de irrigación, agricultura de contorno y agrosilvicultura. En el ámbito hídrico, las buenas prácticas de gestión, hacen referencia principalmente a la modificación de gestión del uso de las tierras cultivables, particularmente aquellas destinadas a la reducción de la erosión y el escurrimiento de nutrientes. Estos protocolos, pueden contribuir con la protección de suministros de agua potable, al igual que la recreación, el hábitat de los animales, la pesca, entre otros usos agrícolas, como el riego y los bebederos.

De otro lado Fuenmayor (2017), contempla el uso de los nanosensores para la agricultura de precisión, con lo cual hace referencia a la implementación de tecnología informática aplicada al manejo a gran escala de la agricultura. Afirma, el conjunto de estas tecnologías promete mayores rendimientos y una disminución en los costos mediante la simplificación y centralización de procesos lógicos. Es decir, toma el control exhaustivo y constante de las condiciones ambientales; para lo cual, son necesarios sensores inalámbricos omnipresentes que implementen dispositivos a nanoescala, dichos sensores hacen posible la detección de contaminantes, pestes, contenido de nutrientes, estrés asociada a la sequía, el monitoreo de la temperatura, presencia de patógenos y la falta de nutrientes.

La aplicación de nanosensores o sensores nanoestructurados puede extender la vigilancia, incluso, a la composición química de los cultivos, por ejemplo, para decidir sobre las fechas óptimas de cosecha. Aunque aún estas tecnologías no están disponibles comercialmente, según algunos expertos, lo estarán en un futuro cercano (Fuenmayor, 2017)

Según (Cui, y otros, 2020). Los fertilizantes químicos son usados en la agricultura para aumentar el rendimiento de los cultivos asegurando así la demanda alimentaria que

depende del crecimiento demográfico mundial. Sin embargo, la eficiencia del proceso de fertilización se ve afectada debido a las pérdidas de nitrógeno (N) y fósforo (P) por escorrentía superficial a fuentes de agua, generando la eutrofización y el deterioro ambiental de los sistemas acuáticos en todo el mundo. Según (Lyua, y otros, 2019) en la llanura del norte de China utilizan entre 550-600 Kg N/ ha de fertilizantes sintéticos por año, los cuales presentan bajos rendimientos en los cultivos por sus pérdidas significativas de N en el medio ambiente.

Durante el estudio ejecutado por (Cui, y otros, 2020), sobre la pérdida de nitrógeno y fósforo en un cultivo de arroz en la costa este de China y el efecto a largo plazo de la fertilización química nitrogenada y la aplicación de abonos orgánicos, se usaron tres dosis tanto de fertilizante químico- N como de abono orgánico en un periodo de dos años monitoreando la pérdida de (N) y (P) días después de la aplicación.

El experimento consistió en usar seis dosis diferentes: una sin fertilizante N₀, tres dosis de fertilizante-N de urea (N 46%): (N100) 100 Kg/ha, (N 200) 200Kg/ha, (N300) 300 Kg/ha, las otras dos dosis fueron de una mezcla de fertilizante-N y 30% de abono orgánico comercial (granular: C 21%, N 2.3%, P 2.1%): (ON200) 200Kg/ha, (ON 300) 300 Kg/ha que fueron suministradas en un diseño de bloques al azar, con un total de 18 parcelas de (8 m por 7 m), cada una se cercó con una película impermeabilizante para evitar el movimiento lateral del agua, fuera de cada parcela se construyó un tanque de concreto con tubería de polivinilo (PVC) para drenaje con un medidor de flujo, para registrar el volumen de la escorrentía superficial. El nivel del agua se mantuvo entre 5 y 10 cm en cada parcela con riego regular. Las parcelas se drenaron cuando la profundidad del agua supero los 10 cm después de la lluvia. Además, el agua fue drenada durante la aireación de mitad de temporada y el drenaje terminal antes de la cosecha. (Cui, y otros, 2020)

En el experimento se realizó análisis de agua superficial drenada y suelo tomado a una profundidad de 15 cm antes de la cosecha de arroz para determinar las concentraciones. Durante los tres eventos de escorrentía superficial analizados se encontró que las variaciones en las cargas de pérdidas de nutrientes N en el año 2018 variaron bajo las

diferentes dosificaciones de fertilizantes-N, siendo según las mediciones de: 0,31 kg/ha en el tratamiento con N0 a 1,43 mg/ha en los tratamientos N300 y ON300 para el nitrógeno total (TN). No se registraron diferencias significativas entre N200, N300, ON200 y ON300. La carga de pérdida de para el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) y para los nitratos y nitritos ($\text{NO}_3^- \text{-N}$). aumentó respectivamente de 0.18 a 0.50 kg/ha y de 0.15 a 0.24 kg/ha, y fue significativamente menor en ON200 y ON300 que en N200 y N300.

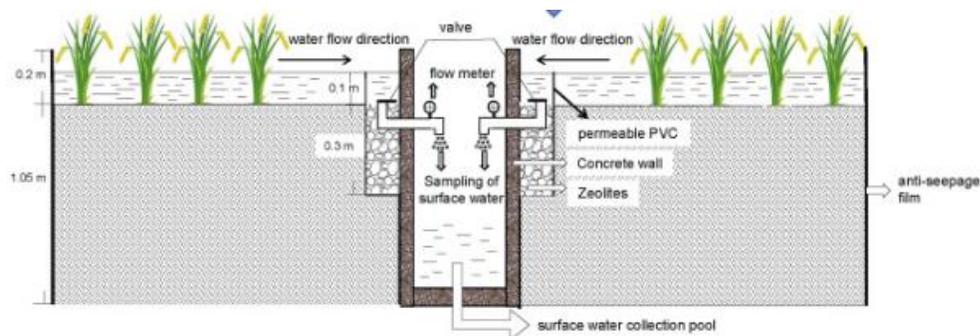


Ilustración 11. Sitio experimental y diagrama esquemático de la configuración de recolección de escorrentía superficial.

Fuente: (Cui, y otros, 2020, pág. 3)

En el 2019 se evidencia un aumento drástico en la carga de pérdida de N en comparación con el año anterior, siendo la variación en TN de 3.90 a 20.51 kg/ha. La mayor parte de la pérdida de N fue en forma de $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ en las dosis de fertilizantes-N, también se encontraron dominantes las pérdidas de N asociadas a los tratamientos ON200 y ON300. Al igual que en 2018, las pérdidas de TN y $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ aumentaron significativamente junto con la tasa de aplicaciones de fertilizantes de N.

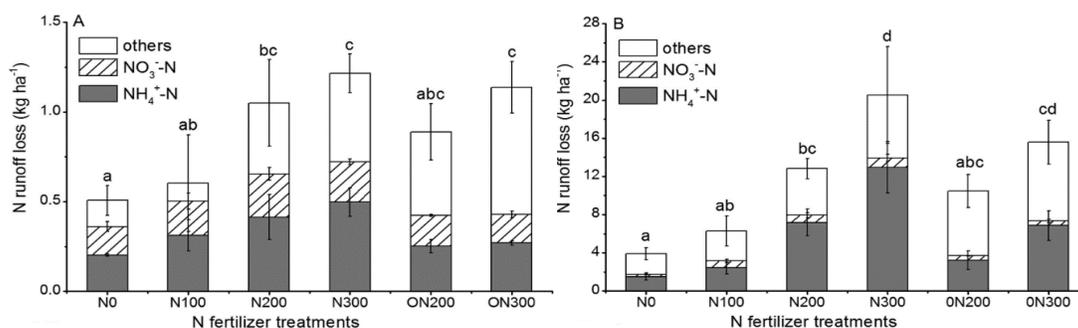


Ilustración 12. Pérdidas de (N) por escorrentía año 2018 (A), 2019 (B).

Fuente: (Cui, y otros, 2020, pág. 6)

Aspectos relevantes:

- a) El contenido de nutrientes era normalmente alto en la escorrentía superficial inicial, que ocurrió casualmente después de las aplicaciones de fertilizantes con N en la etapa temprana del crecimiento del arroz y disminuyó gradualmente a un valor bajo en los eventos de escorrentía posteriores.
- b) Se considera que la alta solubilidad de los fertilizantes minerales es la razón principal para aumentar la transferencia de N en la escorrentía inicial.
- c) Los resultados sugirieron que la escorrentía superficial inicial con altos contenidos de N podría ser el principal riesgo de pérdida de escorrentía de N del campo de arroz.
- d) Las concentraciones de TN y $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ generalmente aumentaron significativamente junto con la tasa de fertilizante N.
- e) Los contenidos de TN y $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ en N300 fueron generalmente más altos que en ON300 y N200 fue más alto que ON200. Esto podría atribuirse a la lenta liberación de N en el suelo tras la descomposición de la materia orgánica.
- f) Las variaciones altas y significativas de las concentraciones de N ocurrieron principalmente en los eventos iniciales de escorrentía superficial que tuvieron lugar en 8 días después de la aplicación de fertilizante de N en el experimento de dos años.
- g) La carga total de pérdida de N en los tratamientos varió de 0.51 a 1.22 kg/ha en 2018 y de 3.90 a 20.51 kg/ha en 2019 durante las temporadas de cultivo de arroz; estas diferencias podrían atribuirse a las variaciones en la precipitación pluvial, las prácticas de fertilización y las características del suelo.

4.2 Fertilizantes de liberación lenta, controlada y estabilizados SCRSF

- **Fertilizantes de liberación lenta o controlada**

Los fertilizantes de liberación controlada es una tecnología que disminuye la velocidad de disolución de macronutrientes como el nitrógeno-N, aumentando el tiempo de retención de los fertilizantes en la matriz del suelo, gracias al estudio metabólico de absorción de nutrientes por parte de las plantas, facilita el diseño de sistemas de liberación controlada que permiten la difusión de nitrógeno-N según el requerimiento nutricional en un ciclo de un cultivo típico (ilustración 13), mejorando la eficiencia de uso de fertilizantes-N al disminuir las pérdidas por escorrentía y lixiviación que de no ser por esta tecnología

llegarían hasta fuentes de agua superficiales y subterráneas; a través de diferentes mecanismos como la disolución, osmosis y el hinchamiento de estructuras que van desde Microencapsulación, estructuras preparadas por incorporación física Bombas osmóticas, hasta la adsorción sobre resinas de intercambio iónico. (Aguilar, 2014)

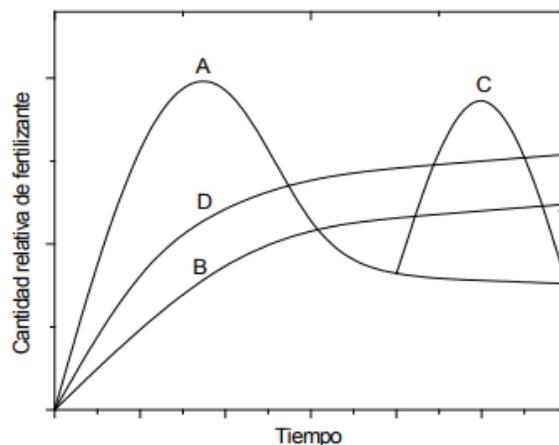


Ilustración 13. Cantidad relativa de fertilizante disponible durante el periodo de crecimiento. Fuente: (Aguilar, 2014)

La tecnología de liberación controlada consiste en gránulos de fertilizantes con un recubrimiento polimérico. Durante el proceso de producción, los nutrientes solubles en agua son encapsulados con una cobertura o matriz. Esta cobertura evita la disolución inmediata del fertilizante cuando es aplicado al suelo. El espesor de la cobertura es el que determina la longevidad de la liberación del nutriente. (López, 2019)

Los fertilizantes de liberación controlada se pueden clasificar en compuestos orgánicos o inorgánicos de baja solubilidad con liberación lenta, y fertilizantes cubiertos por una barrera física que controla su liberación, en la tesis Preparación y evaluación en suelo de fertilizantes de liberación controlada cubiertos con polímeros biodegradables, describe la preparación de fertilizantes de liberación controlada incorporados en matrices poliméricas basadas en almidón, xantano, alginato y quitosan, en él se emplea el fertilizante-N sólido $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, debido a su alta solubilidad en agua y comercialización, usando diferentes formulaciones y comparando sus perfiles de liberación en agua; así como lixiviación en suelo, ajustando los datos obtenidos según los modelos Korsmeyer – Peppas

y de primer orden respectivamente, lo que facilito evidenciar cuál de los sistemas empleados junto con las formulaciones mostraba una mejor eficiencia, cumpliendo con las características de fertilizante de liberación controlada en suelo de no más del 15% liberado tras 24 h y no más de 75% tras 28 días de aplicado, según el Comité de Estandarización Europeo un fertilizante. (Aguilar, 2014)

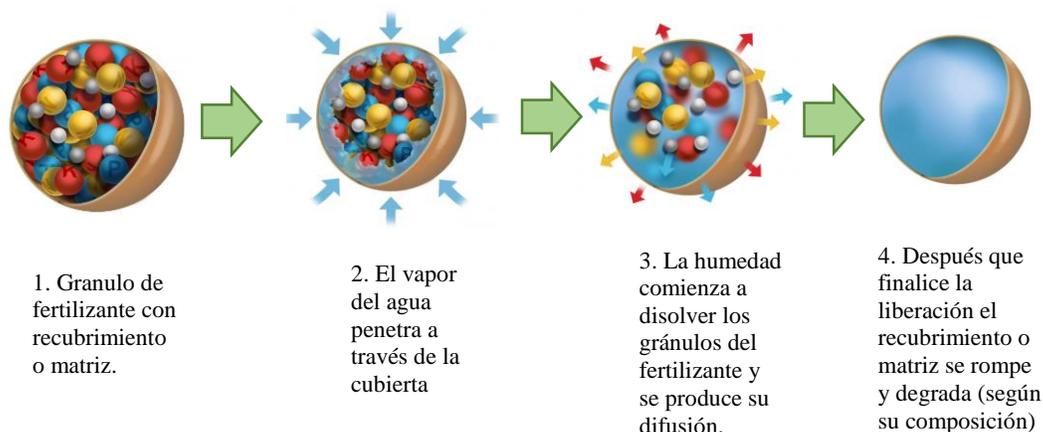


Ilustración 14. Estructura y modo de acción de los fertilizantes de liberación lenta SRF
Fuente: adaptado de Usos de fertilizantes de liberación controlada en la agricultura (López, 2019)

Aguilar en su estudio concluye que la formulación basada en xantano tardó alrededor de 90 min en liberar el 50% de los nutrientes incorporados al agua, es decir hasta tres veces más que las demás formulaciones; los ensayos de liberación y lixiviación, permitieron determinar que estas cuatro formulaciones pueden ser declaradas como fertilizantes de liberación controlada, conforme a lo establecido por el Comité de Estandarización Europeo ofrece a las plantas una nutrición equilibrada de acuerdo a sus necesidades con una única aplicación por ciclo de cultivo, mejorando el desarrollo de la planta, el uso de nutrientes, ahorrando mano de obra y minimizando el impacto ambiental al recurso hídrico. Sin embargo, es importante tener en cuenta los factores que afectan el desempeño de estos sistemas de liberación en condiciones de campo, como lo son el tipo de suelo, textura, contenido de materia orgánica, acidez, pH y humedad (irrigación), para facilitar el entendimiento de los mecanismos de liberación y así mismo la mejora la NUE de los productos actualmente comercializados (Aguilar, 2014).

Los fertilizantes de liberación lenta (SRF por sus siglas en inglés), especialmente los diseñados para la liberación gradual de macronutrientes como el nitrógeno-N y la retención de agua, son para (Wei, Wang, Chu, & Li, 2019), la solución, no sólo a los problemas de baja NUE, sino la respuesta a los problemas para cultivar en áreas donde el acceso al agua es limitado. En su artículo Preparación y Caracterización de Fertilizantes de Liberación Lenta y Retención de agua a base de almidón y halloisita. (Wei, Wang, Chu, & Li, 2019) Analiza la constitución de los SRF, su aplicabilidad e impacto; determinando que la implementación de agua destilada en lugar de solución salina, permite un mayor hinchamiento de las partículas de SRF; además al añadir nanoarcillas como los nanotubos de halloisita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$, HNT] reduce la velocidad de la liberación de la urea.

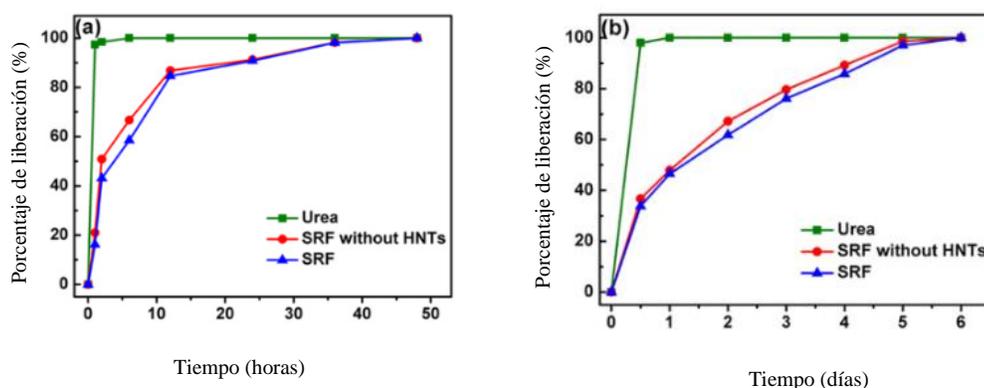


Ilustración 15. Comportamiento de liberación de urea, SRF sin HNT y SRF con HNT en agua destilada (a) y en suelo (b).

Fuente: (Wei, Wang, Chu, & Li, 2019)

a) El porcentaje de liberación de urea pura sin portadores en agua destilada alcanzó el 98% en 2 h, el de SRF con HNT es menor que la de SRF sin HNT; siendo los porcentajes de liberación de urea de SRF sin HNT y SRF con HNT dentro de las 2 h, 6 h y 12 h fueron aproximadamente 50.9%, 66.7%, 86.8% y 43.1%, 58.5%, 84.6%, respectivamente. b) muestra el porcentaje de liberación de diferentes tipos de fertilizantes en el suelo, siendo significativamente menor que en el agua, ya que el menor contenido de agua libre en el suelo reduce la tasa de intercambio de agua y fertilizantes, reduciendo así la tasa de liberación. La cantidad de urea de SRF sin HNT y SRF con HNT dentro de 1 d, 3 d y 5 d

fue de aproximadamente 47.9%, 79.6%, 98.6% y 46.5%, 76.1%, 97%, respectivamente. Debido a que los HNT poseen un área de superficie específica alta, su existencia puede limitar la difusión de urea en el agua, mejorando así la propiedad de liberación sostenida de fertilizante (Ilustración 15). Gracias a que el SRF se preparó a partir de polímeros naturales renovables y HNT de bajo costo, tiene una aplicación potencial en la agricultura y la horticultura. (Wei, Wang, Chu, & Li, 2019)

Aspectos relevantes:

- Los fertilizantes se obtuvieron en solución de urea por polimerización radical.
- Los fertilizantes se basaron en almidón, nanotubos de halloysita y β -ciclodextrina
- Los nanotubos de halloysita podrían cargar más urea por acidificación
- Los fertilizantes tienen las propiedades de liberación lenta y retención de agua.

Un factor más a agregar a la ecuación en la implementación nuevas tecnologías para el NUE, yace en la generación de lixiviados nitrogenados provenientes de cultivos como el durazno que usan grandes cantidades de fertilizantes-N por ende y al igual que con los SRF; la implementación de fertilizantes de liberación controlada en bolsa, contribuye con la disminución de dichos lixiviados mitigando su llegada a fuentes hídricas. (Xiao, y otros, 2019), desarrolló un estudio sobre un cultivo de duraznos, en la cual monitoreó la aplicación de esta tecnología, en la que se hace uso de una bolsa de papel y polietileno microperforada de manera uniforme, que permite la liberación controlada del fertilizante NPK usado en el suelo.

El uso de este SCRF redujo la cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicados en un 65-82% en comparación con los métodos comunes de aplicación de fertilizantes sin disminuir el rendimiento del durazno, por lo que tiene un enorme potencial para reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado utilizado, así como los costos de entrada de fertilizantes en la producción de duraznos. Otro de los resultados arrojados se halló en la generación de raíces más densas, pues se requería de una menor ramificación de estas para el aprovechamiento de los nutrientes, mejorando el NUE, la productividad de los árboles

mientras se redujeron los costos de producción asociados con la compra de fertilizantes y se reducen las lixiviaciones que contaminan acuíferos. (Ilustración 16)

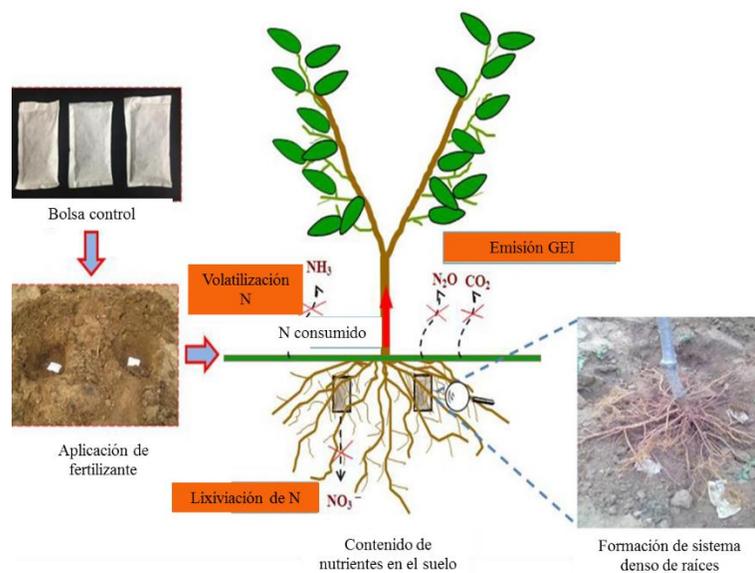


Ilustración 16. Aplicación de las bolsas de liberación lenta cargadas de urea en un cultivo de durazno.

Fuente: (Xiao, y otros, 2019)

Aspectos relevantes.

- El fertilizante de liberación controlada por bolsa puede mantener un suministro estable de nutrientes al suelo.
- Lo más destacado El fertilizante de liberación controlada por bolsa disminuye la lixiviación de nitrógeno, la volatilización del amoníaco del suelo del huerto de duraznos.
- El fertilizante de liberación controlada por bolsa promueve la formación de un sistema de raíces densas de duraznos.
- El fertilizante de liberación controlada en bolsa tiene un enorme potencial para reducir la cantidad de nitrógeno aplicado en la producción de durazno.

• Inhibidores de nitrificación

Para generar altos rendimientos en la producción es necesaria la aplicación de fertilizantes nitrogenados-FN; sin embargo, la eficiencia de uso del nitrógeno (N) menor al 50 %, debido a las pérdidas por procesos como la desnitrificación; los inhibidores son en

fertilizantes con concentraciones de sustancias capaces de inhibir la actividad microbiana responsable de la nitrificación, específicamente de bacterias del género *Nitrobacter* sp, retrasando la oxidación del nitrito NO_2^- a nitrato NO_3^- . (Daza, Ladino, & Urrutia, 2018)

El Biochar es un agente de enmienda sostenible del suelo, ha sido ampliamente estudiado debido a su potencial para retener la humedad y los nutrientes. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el biochar tiene una capacidad muy limitada para mejorar la retención de nitrito (NO^- - 2) o nitrato (NO^- - 3) con carga negativa. Aunque el amonio cargado positivamente (NH^+ + 4) se puede retener mejor mediante biochar, generalmente es susceptible a la nitrificación y se puede transformar fácilmente en NO^- - 2 y / o NO^- - 3 altamente móviles. En la práctica, la dicianidamida (DCD) se ha utilizado para inhibir la nitrificación, preservando el N en su forma relativamente inmóvil como NH^+ + 4.

En este estudio, se investigaron las influencias del biochar en la efectividad del DCD como inhibidor de nitrificación en un suelo modificado con biochar combinando los resultados experimentales de incubación. Se descubrió que el biochar estimula la degradación de DCD, ya que la tasa de degradación máxima aumentó ligeramente de 1.237 a 1.276 $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ pero el coeficiente de media saturación aumentó significativamente de 5.766 a 9.834 mg kg^{-1} . (Li & gang, 2020)

4.2 Uso de microorganismos promotores del crecimiento en plantas-PGPM

Dentro de las tecnologías de fertilizantes se encuentra el uso de microorganismos promotores de crecimiento de las plantas-PGPM (por sus siglas en inglés) como los biofertilizantes, los cuales mejoran los nutrientes del suelo facilitando el acceso de estos a los cultivos, siendo una de las formas más prometedoras de aumentar la productividad de los cultivos de una manera ecológica, al disminuir los efectos causados por el uso excesivo de fertilizantes químicos. En el artículo de revisión sobre los Biofertilizantes microbianos, recursos biológicos y tecnologías ecológicas para la sostenibilidad agrícola y ambiental, clasifica los biofertilizantes según su aplicabilidad como: fijadores de nitrógeno, solubilizadores de nutrientes, su papel biotecnológico para mejorar el metabolismo de las

plantas, así como su uso en la biorremediación, la biofortificación del suelo y la mejora del estrés hídrico de las plantas (Kour, y otros, 2020).

Los biofertilizantes son esencialmente preparativos de células vivas o latentes de cepas microbianas viables que mejoran la eficiencia en la absorción de nutrientes de las plantas, promoviendo el crecimiento al aumentar la oferta o disponibilidad de nutrientes primarios a la planta huésped, así como su resistencia ante diferentes tipos de estrés ambiental que puedan ser patógenos; gracias a sus asociaciones en la región rizosférica, o en el área foliar; estos pueden ser suministrado externamente por medio de la semilla o directamente al suelo; o se pueden encontrar de forma endófitas al interior de la planta (Ilustración 18). La tecnología empleada en la fabricación de dichos biofertilizantes/bioinoculantes es considerablemente simple y de bajo costo (Kour, y otros, 2020)

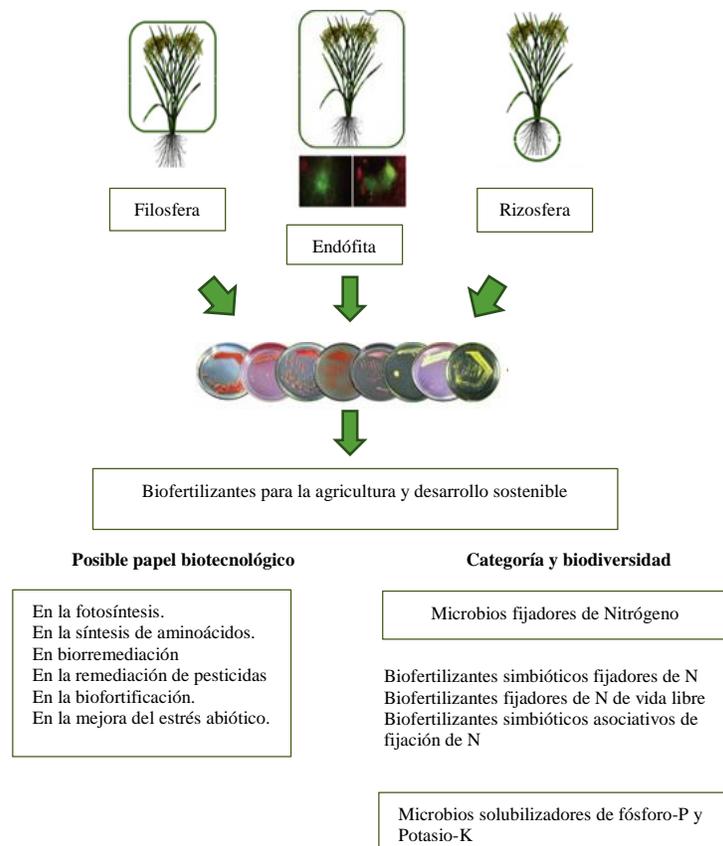


Ilustración 17. Microbiomas de plantas y suelos con múltiples atributos que promueven el crecimiento de las plantas como biofertilizantes para PGP y fertilidad del suelo en condiciones naturales y estresadas. Fuente: adaptación propia de (Kour, y otros, 2020, pág. 3)

Biofertilizantes fijadores de Nitrógeno-BNF:

Dentro de los Biofertilizantes más conocidos y explorados para fijar nitrógeno-N se encuentran los microbios que se presentan en la siguiente tabla según su mecanismo usado para fijar N.

Tabla 2. Microbios fijadores de nitrógeno simbióticos de vida libre y asociativos y sus principales beneficios.

Mecanismo	PGPM	Beneficios
<i>Biofertilizantes fijadores de nitrógeno simbiótico</i>	Familia: Rhizobiaceae Géneros: Allorhizobium Azorhizobium, Bradyrhizobium, Mesorhizobium, Sinorhizobium y Rhizobium	Fija el gas atmosférico N ₂ al reducirlo a NH ₃ que luego es utilizado por las plantas para sintetizar una gama de vitaminas, proteínas, compuestos que contienen nitrógeno. La fijación de N se lleva a cabo mediante una enzima compleja nitrogenasa que consiste en dinitrogenasa reductasa con hierro como cofactor y dinitrogenasa con molibdeno y hierro como cofactor. Es una práctica eminente en la agricultura para asegurar el suministro suficiente de nitrógeno para las legumbres sin utilizar fertilizantes nitrogenados.
	Azolla (Anabaena azollae)	Tiene la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico en asociación con las algas verde azuladas que fijan N ₂ puede fijar alrededor de 40-60 Kg N / ha de cultivo de arroz
	Acetobacter	Fijador de nitrógeno aeróbico obligatorio. Producción de ácido indol acético y ácido giberélico que promueve la proliferación y aumenta la cantidad de raicillas. Es un inoculante importante para la caña de azúcar. También forma una asociación simbiótica con el café.

Mecanismo	PGPM	Beneficios
<p><i>Biofertilizantes fijadores de nitrógeno de vida libre</i></p>	<p>Familia: Azotobacteriaceae</p> <p>Género: <i>Azotobacter</i></p> <p>Especies:</p> <p>A. beijerinckii A. insignis A. macrocytogenes y A. vinelandii A. indicum.</p>	<p>Fija el nitrógeno atmosférico en plantas no leguminosas, particularmente algodón, arroz y vegetales, pero sin ninguna relación simbiótica y no necesita un huésped específico.</p> <p>Puede fijar 15-20 kg / ha de nitrógeno / año y aumenta la germinación y el vigor en plantas jóvenes.</p> <p>La inoculación de <i>Azotobacter</i> y <i>Pseudomonas</i> más la fertilización disminuyeron la aplicación de fertilizantes químicos en un 25–50% en el campo.</p> <p>diferentes especies de <i>Azotobacter</i> secretan fitohormonas, complejo de vitamina B y, además, otros compuestos bioactivos que pueden actuar como agentes de biocontrol contra los patógenos de las raíces y además promueve el crecimiento de las raíces y la absorción de los minerales.</p>
	<p>Cianobacterias o las algas verdeazuladas</p> <p>Anabaena Nostoc Calothrix y Aulosira</p> <p>Cepas fijadoras N en arroz: Tolypothrix sp Scytonema sp Nostoc linkia Calothrix sp Aulosira fertilísima Anabaena variabilis</p> <p>Cepas fijadoras N en Trigo Anabaena y Nostoc</p>	<p>fijadores de nitrógeno fotosintéticos.</p> <p>juegan un papel importante en la construcción de la fertilidad del suelo y, por lo tanto, aumentan el rendimiento.</p> <p>excreción de diversas sustancias promotoras del crecimiento que incluyen fitohormonas, diversas vitaminas, aminoácidos, aumentando la capacidad de retención de agua.</p> <p>son capaces de disminuir diversos tipos de contaminantes y tienen ventajas como organismos biodegradables potenciales.</p> <p>Los efectos ventajosos de la inoculación con cianobacterias se han reportado en varios cultivos como arroz, trigo, cebada, chile, algodón, lechuga, maíz, avena, rábano, tomate.</p> <p>se ha encontrado que fijan alrededor de 20-25 Kg de N / ha</p>

Mecanismo	PGPM	Beneficios
<i>Biofertilizantes simbióticos asociativos de fijación de nitrógeno</i>	Género: Azospirillum Especies: A. brasilense A. lipoferum	Fija un rango considerable de nitrógeno aproximadamente 20–40 Kg de N / ha / año en plantas no leguminosas. Produce promotores de crecimiento como IAA, giberelinas y citoquininas. Los principales efectos de la inoculación con Azospirillum consisten en los cambios en la morfología de la raíz que finalmente mejora el crecimiento de la planta. podría ayudar en la supervivencia de las plantas en condiciones estresantes al inducir cambios en la elasticidad de la pared celular y ajustes osmóticos. Las cepas de Azospirillum se comercializan como biofertilizantes en varios países, incluidos África, Argentina, Australia, Bélgica, Brasil, Alemania, Francia, India, Italia, México, Pakistán, Uruguay y EE. UU.

Fuente: Elaboración propia beneficios según (Kour, y otros, 2020)

(Chittora, Meena, Barupal, Swapnil, & Sharma, 2020), Estudiaron las cianobacterias como biofertilizante fijadoras de Nitrógeno (BNF) para la agricultura sostenible, en su estudio presentan diferentes mecanismos, donde varían la utilización de luz solar o artificial, el estado abierto o cerrado del sistema para la producción de cianobacterias y microalgas como Arthrospira, Chlorella, Haematococcus y Dunaliella a gran escala, así como su papel en la agricultura sostenible dependiendo de la característica de su metabolito. Se estima que anualmente aproximadamente de 10 a 30 kg / ha de nitrógeno es fijado por esteras densas de cianobacterias.

Los efectos de las aplicaciones de biofertilizantes a menudo han sido inconsistentes, lo que dificulta su adopción generalizada por parte de los agricultores. Las razones pueden ser múltiples, como las condiciones del suelo, la identidad de la cepa o el genotipo del huésped. (Schütz, y otros, 2018). Sin embargo, se deben superar algunos

desafíos tecnológicos para que su producción sea comercialmente viable; a pesar de ello debido a su utilidad para agregar materia orgánica y liberar sustancias promotoras de crecimiento, solubilizar fosfatos insolubles, así como su bajo costo y su responsabilidad con el medio ambiente, las convierte en potenciales emergentes como biofertilizantes.

Aspectos relevantes:

- a) Una de las desventajas del uso de PGPM es que están restringidos a las condiciones climáticas y edáficas de la zona donde se quieran aplicar.
- b) Los PGPM como biofertilizantes ha logrado un avance significativo a nivel mundial.
- c) La interacción entre los miembros diferentes tipos de microbios, conlleva a procesos que benefician el crecimiento de las plantas y la salud del suelo, mejorando la viabilidad del uso de los PGPM.
- d) El uso de los PGPM a escala de cultivos exigirá que se aborden los problemas numéricos, ya que esta tecnología se encuentra en fases de laboratorios e invernaderos.
- e) Son necesarios esfuerzos y colaboración entre expertos en genética de plantas y microbios, biología molecular y ecología para que se puedan lograr con éxito tecnologías agrícolas sostenibles basadas en microbios.
- f) Si se logran escalar la tecnología PGPM a cultivos conducirá a una alta productividad con inversiones insignificantes de energía y químicos simultáneamente con presiones mínimas sobre el recurso hídrico y el medio ambiente en general.

4.3 Uso de nanofertilizantes para el uso eficiente del nitrógeno

La aplicación de nanotecnología para el uso eficiente de nutrientes (NUE) En la creación sistemas de control de liberación de nutrientes, es otra de las tendencias implementadas para magnificar la eficacia de los fertilizantes, los nanofertilizantes son usados para reducir las pérdidas de más del 70% de fertilizantes nitrogenados convencionales que llegan al medio y causan graves daños a recursos naturales como el agua, este nitrógeno-N es encapsulado en nanoparticulas para aprovecharse de forma eficaz, al facilitar la absorción de los nutrientes por los tejidos nanoporosos de las plantas,

convirtiéndolos en fertilizantes más eficientes y económicos a largo plazo (Fuenmayor, 2017).

Las nanopartículas-NPs pueden aplicarse foliarmente mediante aspersión y en el agua de riego a la zona de las raíces, pudiendo luego transportarse a diversos sitios de las plantas por las rutas del xilema y el floema, donde inducirán múltiples respuestas fisiológicas y bioquímicas. Las NPs inician su recorrido mediante el proceso de absorción y translocación en la raíz por la ruta del simplasto y apoplasto, en seguida llegan a la corteza y atraviesan la endodermis por el tejido conductivo del xilema; luego continúan su movimiento ascendente en el xilema; cuando las NPs se aplican al follaje el transporte hacia las raíces siguen la vía del floema, (Ilustración 12) (Lira, Menézas, De los Santos, & Vera, 2018, pág. 19)

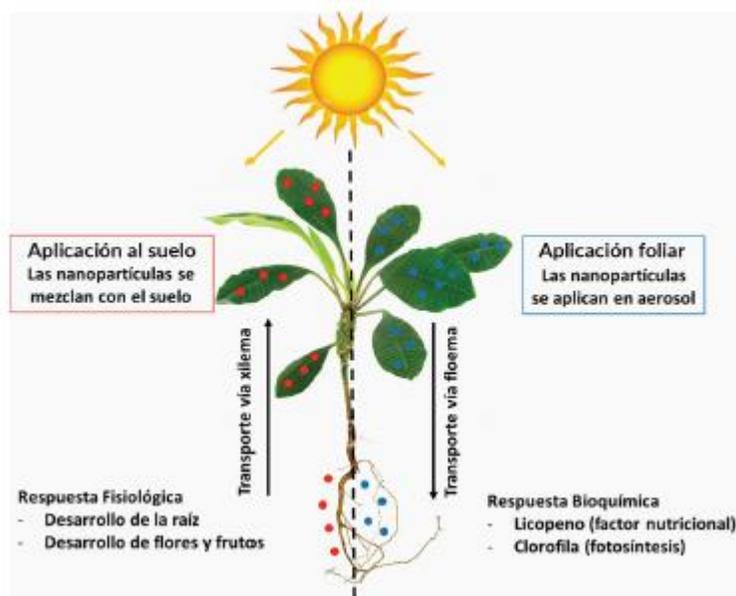


Ilustración 18. Aplicación de nanopartículas NPs y su respuesta en plantas.

Fuente (Lira, Menézas, De los Santos, & Vera, 2018, pág. 19)

Para Lira, Menézas, De los Santos, & Vera (2018), el ámbito de la agricultura no convencional el uso de NT para la formulación de nanoinsumos, permite mejorar el uso de la eficiencia de los productos utilizados; de igual manera se consigue disminuir la cantidad de los agroquímicos, con lo que se promovería una agricultura sustentable y amable con el

entorno; además agrega, según artículos en revistas indexadas de gran renombre, se resalta que la NT es un campo prometedor de la investigación inter y multidisciplinaria orientada a mejorar la productividad de los agroecosistemas.

Con la NT se abre un amplio abanico de oportunidades en diversos campos de la agricultura para la formulación de agroquímicos con productos conteniendo NPs, ya sean metálicas, orgánicas o derivadas del carbono; por lo tanto, los usos y beneficios potenciales de la NT son enormes para fabricar nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas y nanosensores, en el contexto de la nueva revolución verde. (Lira, Menézas, De los Santos, & Vera, 2018)

Las propiedades físicas de los componentes de los nanofertilizantes cambia al disminuir su escala, la cual al conjugarse con la aplicación de biopolímeros y nano silicatos permite controlar la liberación de nutrientes como el nitrógeno-N; el artículo: Fertilizantes nano habilitados para controlar la liberación y usar la eficiencia de los nutrientes; describe el estado actual del desarrollo de nanofertilizantes los cuales han sido estudiados en diferentes artículos de revisión según su contribución a la agricultura. (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018)

Estos nanofertilizantes se pueden dividir en tres categorías según su método de fabricación y su uso en nanomateriales hechos de micronutrientes; nanomateriales hechos de macronutrientes; y nanomateriales utilizados como portadores de macronutrientes; estos últimos a su vez se dividen en seis categorías: nano arcillas, nanopartículas de hidroxiapatita, sílice mesoporosa, nanomateriales a base de carbono, nanopartículas poliméricas y otros nanomateriales. (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018); Se presentan algunos de los nanofertilizantes usados para el uso eficiente de nutrientes nitrogenados (Ilustración 20).

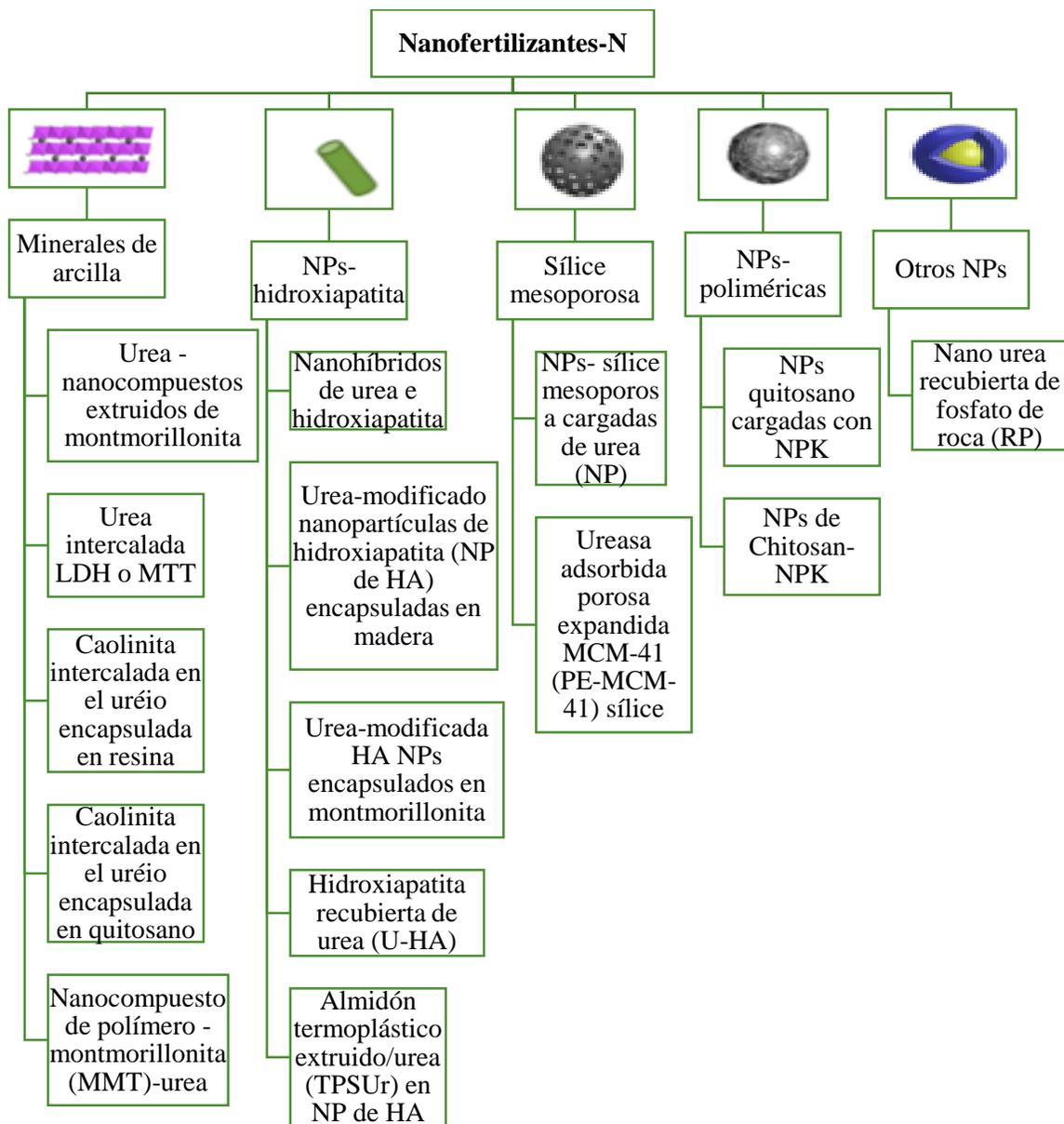


Ilustración 19. Fertilizantes nano-activados para controlar la liberación y la eficiencia de uso de los nutrientes nitrogenados.

Fuente. Elaboración propia según (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018).

Los detalles sobre las propiedades, estrategias de aplicación y cultivos específicos, beneficios agronómicos de los anteriores nanofertilizantes, descritos en el Resumen de los métodos para controlar la liberación y la eficiencia del uso de los fertilizantes, (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018); se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición de los nanofertilizantes-N, propiedades, métodos de aplicación y su efecto en cultivos

Composición del nanofertilizante	Propiedades	Métodos de aplicación agronómica y su efecto en cultivos
Caolinita intercalada en el uréio encapsulada en resina	La intercalación de la urea en la caolinita provocó una liberación de nitrógeno en el agua tres veces más lenta que la de la muestra no intercalada; la liberación de nitrógeno se redujo al aumentar el tamaño de los gránulos y el grosor de la capa	Ensayos de suelo en arroz (<i>Oryza sativa L.</i>) en condiciones de invernadero. La caolinita intercalada en el uréio y encapsulada en la resina condujo a la mayor producción.
Nanohíbridos de urea e hidroxiapatita	Varillas con un diámetro de 15 a 20 nm y longitudes de 100 a 200 nm); la urea formó enlaces débiles con la HA a través de sus grupos carbonilo y amina; eficiencia de carga= relación de 6:1 por peso (urea: HA NPs); liberación más lenta hasta 1w en comparación con los minutos para la urea pura; la liberación de urea de un nanohíbrido siguió un mecanismo controlado por difusión en un modelo de Higuchi.	Aplicación al suelo en campos de arroz. 8,2% de aumento del rendimiento; la mitad de la demanda (50 kg/ha) de N; 30% de aumento en la eficiencia del uso agronómico de nitrógeno; no se encontraron pruebas de que los NP de HA fueran internalizados por la planta.
Urea-modificada HA NPs encapsulada en montmorillonita	Los PN de hidroxiapatita utilizados eran de tipo varilla con un diámetro de 15 a 20 nm y longitudes de 100 a 200 nm); la liberación lenta de N en el suelo a diferentes pH; la liberación siguió un modelo de difusión no ficticio.	Arroz en ensayos de macetas; urea (120 kg N/ha); nanofertilizante (60 kg N/ha). Mejora significativa del rendimiento utilizando los nanohíbridos a media dosis de fertilizante convencional.
Hidroxiapatita recubierta de urea (U-HA)	Una liberación más lenta, particularmente para la N, comparada con la urea. Aplicación en el suelo en un experimento en maceta con <i>Festuca arundinacea</i> durante un período de 60 semanas	El máximo rendimiento de materia seca de las hojas se produjo con nanocompuestos de nutrientes vegetales (nanopartículas HA + madera U-HA + madera K) a una dosis del 50%.

Fuente. Elaboración propia según (Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018).

Aspectos relevantes:

- a) En los estudios evaluados, la comparación de los autores sobre la eficacia de los nanofertilizantes frente a sus análogos convencionales mostró que los nanomateriales utilizados como portadores de macronutrientes tiene el mayor aumento medio de eficacia (29%) entre las tres categorías.
- c) Los portadores deben contener una gran cantidad del nutriente de interés, mantener una tasa de liberación adecuada y minimizar la escorrentía y / o conversión de nutrientes en formas que no estén biodisponibles para la planta.
- d) Los modelos cinéticos se ignoraron en gran medida; claramente esta información es de gran importancia para determinar la dosificación y la frecuencia entregadas para satisfacer la demanda del cultivo.
- e) Pocos estudios calcularon el valor de NUE, que es un punto crítico para evaluar la calidad / eficacia del nanofertilizante.
- f) Idealmente, el material nanoestructurado debe ser ambientalmente benigno y económico en relación con los productos actuales, como el quitosano y las nanoarcillas.

4.5 Mejora genética en plantas para el uso eficiente de los nutrientes.

Considerando las diferentes problemáticas e impactos que enfrenta la industria agrícola se han generado diversos tratamientos tecnológicos con el fin de responder de una forma sustentable por la demanda de alimentos que se requerirán durante los próximos años. Estos problemas de manera general se deben a factores bióticos y abióticos que repercuten en los volúmenes de las cosechas generando pérdida económica a los agricultores de productos de granos, frutas y hortalizas. (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

Estos problemas de manera general se deben a factores bióticos y abióticos que repercuten en los volúmenes de las cosechas generando pérdida económica a los agricultores de productos de granos, frutas y hortalizas. Para contrarrestar estos efectos generados por las condiciones del clima y por las deficiencias de macronutrientes y micronutrientes de los suelos los agricultores por lo general realizan prácticas que implican un mayor consumo de pesticidas y fertilizantes nitrogenados que involucran grandes volúmenes alcanzando eficiencias hasta del 30%, el restante llegaría a fuentes de aguas

superficiales, subterráneas afectando los ecosistemas y la salud humana. (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

Una de las tecnologías para mejorar el uso eficiente de los nutrientes NUE, es a través de la mejora genética de las plantas, por medio de enfoques moleculares, mejora de procesos de absorción, transporte y removilización de nutrientes de zonas senescentes. Igualmente se busca que se expresen genes o se inserten genes nuevos por medio de la transgénesis con miras a mejorar la NUE, al manipular los reguladores de transcripción que pueden controlar un grupo de genes involucrados en estos procesos metabólicos. Según (Kant, 2018); sin embargo, estos sistemas requieren muchos años y varias generaciones para obtener las características y resultados esperados, para esto se han incorporado tecnologías en los cultivos como los organismos genéticamente modificados-OGM que son especies vegetales editadas ya sea con la incorporación de genes o la modificación de los mismos mediante ingeniería genética. (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

Los trabajos genéticos que se le realizan a las plantas pueden ser mediante la inserción de secuencias de ADN específicas de la misma planta llamados organismos intragénicos, cisgénicos cuando el gen proviene de otra planta, pero si la fuente proviene de otra especie son llamados organismos transgénicos. (Ilustración 24)

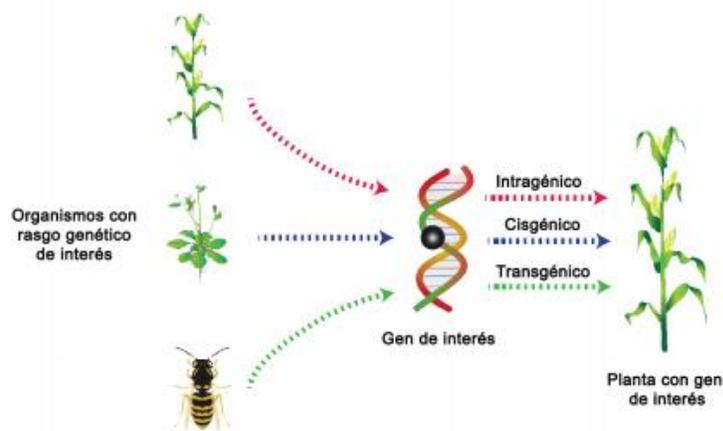


Ilustración 20. Clase de modificación genética, según la procedencia del gen de interés. Fuente: (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

Los métodos convencionales de edición genética permiten cruzar genes entre las plantas o especies que tengan una estrecha relación con compatibilidad sexual para obtener una planta con un gen de interés particular, no obstante, el cruce transmitirá genes que no son de interés y para realizar su selección se tendrán que hacer retro cruza con los materiales parentales para que en las próximas generaciones se vayan eliminando las características no deseadas limitando el método; mientras que con la biotecnología la modificación genética MG permite precisión y especificad genética conllevando a mejores resultados en menor tiempo. (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

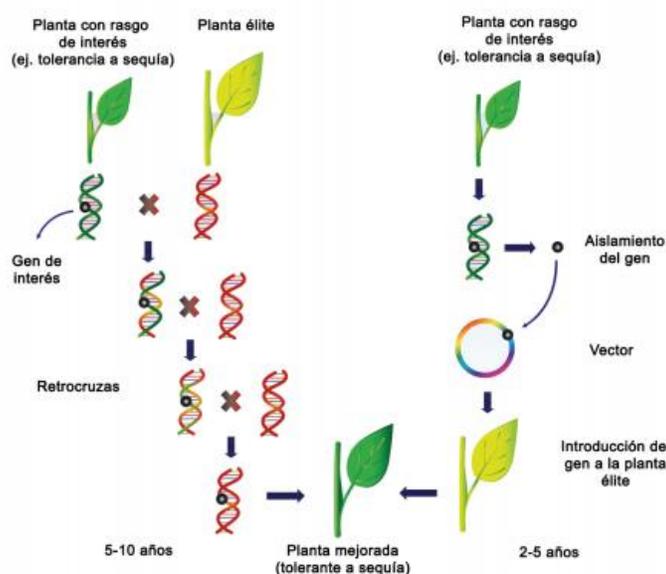


Ilustración 21. Diferencia entre mejoramiento convencional y la ingeniería genética. Fuente (Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)

Existen un amplio rango de herramientas y técnicas de transformación vegetal como son agrobacterium, bombardeo de microproyectiles, tratamiento químico de protoplastos, electroporación de protoplastos, entre otras. Actualmente con la incursión de la biotecnología se crean sofisticadas técnicas que permiten la introducción de rasgos genéticos con mayor precisión sin introducir material genético foráneo no deseado, permitiendo una modificación altamente específica y dirigida mostrando cultivos mejorados indistinto con el cultivo convencional, denominadas como NPBT (Nuevas técnicas de fitomejoramiento), por sus siglas en inglés. Algunas de estas técnicas basadas en nucleasas con dedos de zinc -ZFN, Nucleasas efectoras tipo activador de transcripción-

TALEN, Meganucleasas Mutagénesis dirigida por oligonucleótidos- ODM, Metilación de ADN dependiente de ARN –RdDM y Cría inversa; cada uno de estos métodos de transformación vegetal tienen ventajas y desventajas, sin embargo; agrobacterium y el bombardeo de microproyectiles son actualmente los métodos más usados. (Kant, 2018)

Por otra parte un actualizado y mejor conocimiento en las metodologías empleadas para la transformación genéticas en las plantas ha encaminado a investigaciones con el fin de conocer los genomas y el funcionamiento de todos los actores involucrados en el metabolismo de las especies vegetales y así desarrollar mecanismos que tenga una mayor absorción y uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados NUE, fuentes esenciales para el crecimiento y aumento de producción en los cultivos, reduciendo las pérdidas por procesos de lixiviación, escorrentías superficial y contaminación ambiental. (Kant, 2018)

Dentro de las diferentes fuentes nitrogenadas-N, los nitratos NO_3^- es la principal fuente para los suelos agrícolas de gran preferencia por la mayoría de cereales exceptuando el arroz en cascara que busca fuentes de amonio NH_4^+ . La disponibilidad de NO_3^- en los suelos a menudo es limitada con variaciones espaciales y temporales estableciendo a que las especies vegetales deban tener una rápida adaptabilidad ante estos cambios. La mayoría de las especies vegetales poseen dos tipos de transporte de nitratos determinados por las cantidades disponibles, pudiendo ser; sistemas de transporte alta afinidad cuando el nitrato es $<0.5 \text{ mM}$ y sistema de transporte de baja afinidad cuando el nitrato es $> 0.5 \text{ mM}$. Así mismo, el nitrato además de servir de agente nutritivo actúa como una molécula que marca las señales de procesos que induce a genes durante; el transporte y asimilación, desarrollo de la raíz lateral, desarrollo de la hoja, y tiempo de floración.

Se puede decir que en la actualidad se conoce muy bien los genes y enzimas involucradas en la absorción de nitratos, pero aún faltan estudios en cuanto a los procesos de detección y señalización, los cuales recaen en los mecanismos transportadores de nitrato y la regulación de la removilización del N, aspectos que ayudarían con el aumento del uso eficiente del nitrógeno-NUE en las plantas. (Kant, 2018)

4.6. Tecnologías para el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura colombiana.

Uno de los principales desafíos que propone la (FAO O. d., 2015) como objetivo de desarrollo sostenible es la Agricultura sostenible, según (Sánchez, 2017), en su estudio de mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia, enfatiza la diferencia entre la agricultura sostenible y la ecológica u orgánica, siendo por definición la ecológica mucho más amigable para el medioambiente; según el autor la demanda de este tipo de productos ha ido en aumento en las últimas décadas en países como Europa y Estados Unidos, debido al impacto que genera en la salud de los consumidores; sin embargo en países como Colombia donde la implementación de este tipo de tecnologías limpias aumentan los costos de producción, hace necesario mejor incentivos por parte del gobierno que motiven este tipo de agricultura. (Sánchez, 2017).

En el presente capítulo se describe el estado actual de las tecnologías para el NUE en el territorio colombiano, para ello se utilizó el informe Estadístico de importación y exportación de fertilizantes, acondicionadores de suelo y bioinsumos, del año 2016 suministrado por el ICA, con el fin de identificar cuáles de las tecnologías descritas estaban siendo empleadas por los agricultores colombianos. También se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos y en pag web de noticias nacionales, con el objetivo de identificar el avance en Colombia con respecto a estas tecnologías los cuales fueron resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 4. Tecnologías para el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura colombiana.

Tecnologías para el NUE	Aplicación en Colombia	Referencia
Agricultura de precisión	Con el propósito de mostrar las bondades de la aplicación mecánica de nitrógeno fertilizante a tasa variada frente a los impactos ambientales asociados a esta práctica en un escenario de fertilización a tasa fija, se analizaron estadística y espacialmente los registros de la operación en seis lotes de cultivo de caña de azúcar para cuatro años diferentes. La	(Saavedra, 2018)

Tecnologías para el NUE	Aplicación en Colombia	Referencia
	operación a tasa variada indico estar dentro de los rangos de aceptación con una eficiencia superior al 95% y frente al escenario de tasa fija mostros disminuir por lo menos en un 75% los excesos de nitrógeno potencialmente libre; además en esta primera aproximación, se observaron efectos positivos en los rendimientos para la variedad CC 85-92, en cuanto se encontró una correlación favorable entre las toneladas de caña y azúcar por hectárea y el detalle espacial de las recomendaciones de nitrógeno.	
Fertilizantes SCRSF	Estudio en condiciones controladas para investigar mediante el uso de lisímetros de drenaje, cómo los FN, tanto los SRF (nitrato de calcio y sulfato de amonio) como los SRF (urea recubierta, lombricompost y gallinaza) contribuyen con beneficios ambientales y agronómicos de producción, en un suelo cultivado con albahaca (<i>Ocimum basilicum</i> L).	(Daza, Ladino, & Urrutia, 2018)
	Según el ICA la urea prilada es uno de los SRF comercializados en Colombia con un consumo de 350kg para el año 2015 y en el 2016 no se reporta consumo.	(ICA, 2016)
	Las formulaciones de fertilizante basadas en xantano, xantano-almidón y los polielectrolitos xantano:quitosan y alginato:quitosan, son altamente promisorias como formulaciones de liberación controlada, y teniendo en cuenta que este trabajo es el inicio de una línea de investigación de liberación controlada de formulaciones agroquímica basadas en materiales poliméricos, se abre un gran campo de estudio en la modificación de las matrices poliméricas con el objeto de controlar los perfiles de liberación.	(Aguilar, 2014)
Bioertilizantes fijadores de N	La mayor producción de inoculantes se concentra en el departamento de Cundinamarca con un 48,9 %, asimismo, los principales microorganismos utilizados para el desarrollo de estos productos correspondieron a los hongos micorrizcos del género <i>Glomus</i> y <i>Acaulospora</i> , así como a las bacterias	(Pérez, Bolívar, & Díaz, 2017)

Tecnologías para el NUE	Aplicación en Colombia	Referencia
	<p>Azotobacter chroococum y Bradyrhizobium japonicum. bajo formulación de tipo sólida. El arroz constituye el cultivo más frecuente de aplicación de los inoculantes. existiendo una nula producción de inoculantes biológicos en la mayoría de departamentos que conforman la región Caribe, en los cuales se producen cultivos de gran importancia para la seguridad alimentaria del país.</p> <p>Los inoculantes biológicos en Colombia poseen una actividad biológica variada en un 55,3 %, mientras que el 29,8 % y el 14,9 % presentan como mecanismo de acción la fijación biológica de nitrógeno y la solubilización de fosfato respectivamente.</p>	
Nanofertilizantes	<p>El nitrógeno encapsulado en NP puede aprovecharse mejor, ya que los tejidos absorbentes de las plantas son nanoporosos, lo cual haría a los fertilizantes más eficientes y económicos a largo plazo. Las zeolitas, que son silicatos de aluminio nanoporosos que se encuentran naturalmente o son sintetizados, posibilitan el intercambio iónico y la deshidratación reversible. Estas pueden aumentar la porosidad de los suelos arcillosos y la capacidad de retención de agua de los suelos arenosos, lo cual ayudaría en la reparación y el aumento de la productividad agrícola en tierras secas.</p>	(Fuenmayor, 2017)

Tecnologías para el NUE	Aplicación en Colombia	Referencia
	<p>La ‘nanorrevolución’ está lejos aún de ser algo masivo. Las investigaciones en Colombia en ese campo, según el Minciencias, son muy pocas las que están especializadas en nanoagricultura; “este número de grupos es el reflejo de la poca atención que se le ha prestado hasta el momento a esta tecnología en este sector, desconociendo que como tecnología de propósito general tiene amplias posibilidades de aplicaciones en la producción de insumos y productos para la agricultura y la agroindustria”</p> <p>Las agencias de regulaciones no tienen una política clara sobre el tema y los efectos en la salud o el medioambiente que pueda tener el trabajar a escalas nanométricas aún estamos en una fase de experimentación. “Todavía estamos en una escala de laboratorios, y existe cierta dificultad para producirlo en mayor escala”</p>	(Orjuela, 2020)
	<p>La compañía Eurotrading trae a Colombia, la patente de los nanofertilizantes iniciando su proceso de presentación y trámites ante el ICA, con la línea NanoTech, fertilizantes de alta tecnología, en forma de quelatos, con una proyección a corto plazo de cubrir 100.000 hectáreas en los próximos dos años.</p> <p>En el momento ya están registrados 6 fertilizantes y se desarrollaron los estudios de suelos, comprobando su efectividad, en cultivos como fresas, arándanos, cebolla larga de gran demanda en nuestro país, hortalizas, papa y café entre otros, incluyendo cultivos hidróponicos.</p>	(Eurotrending, 2020)

Tecnologías para el NUE	Aplicación en Colombia	Referencia
Mejoramiento genético en Plantas.	Colombia plantó 100 000 hectáreas de maíz y algodón, con la implementación de la biotecnología a través de la modificación genética, las plantas obtendrán mejores comportamientos frente a los cambios climáticos, aprovechamiento eficiente de nutrientes y mayores desempeños frente al consumo de agua, mejores rendimientos en cosechas disminuyendo la aplicación de fertilizantes en comparación con los que se aplican en la actualidad una vez se complete la información correspondiente a la absorción de macronutrientes en esencial de fuentes nitrogenadas dando lugar a un consumo eficiente disminuyendo significativamente las pérdidas de fertilizantes y contaminación en las fuentes de agua superficiales y subterránea.	(Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)
	En el año 2000 se autorizó el primer OGM en Colombia, el clavel de flor azul, para la producción de flor cortada. A 2016, se habían aprobado un total de 162 autorizaciones para la introducción de especies como algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>), maíz (<i>Zea mays</i>), soya (<i>Glycine max</i>) y arroz (<i>Oryza sativa</i>), destinadas a siembra controlada o comercial en diferentes regiones geográficas, alimento o materia prima para la elaboración de alimentos para consumo humano o animal. De las 162 autorizaciones el 59% han sido para maíz, el 19% para algodón y el 13% para soya; el 9% restante se encuentra representado por cultivos como arroz, remolacha, trigo, claveles, y rosas; cifras que coinciden con la disponibilidad y proporción de eventos de modificación genética por cultivo a nivel mundial reportada en la base de datos de OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2017), según la cual, para el maíz hay un total de 90 eventos de modificación genética, entre simples y combinados o Stacks, para algodón 37 y para soya 31.	(Leguizamon, Vela, Arias, & Cifuentes, 2018)

Fuente: Elaboración propia

5. METODOLOGÍA

Para lograr el cumplimiento del objetivo general identificado para la monografía, se definieron tres objetivos específicos, de manera tal que se pueda cumplir de forma clara y organizada con el objetivo general planteado que es el de *“Identificar nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de fertilizantes nitrogenados en cultivos agrícolas disminuyendo las pérdidas de nutrientes por lixiviación y escorrentía a fuentes de agua superficiales y subterráneas.”* De acuerdo con las siguientes etapas: La etapa de planeación, la etapa de ejecución/construcción y por último la etapa de culminación. (Ilustración 23).

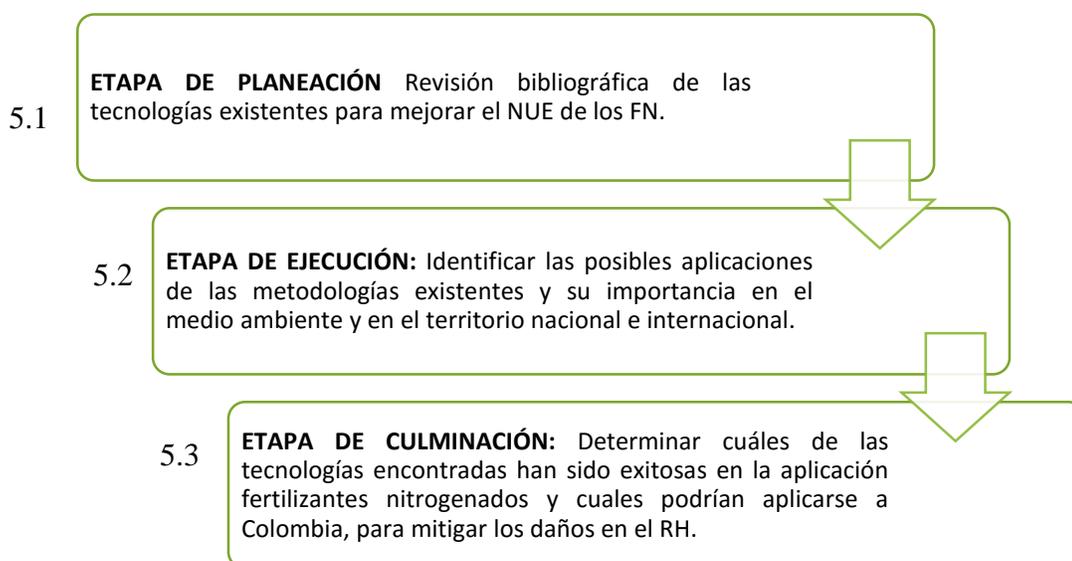


Ilustración 22. Esquema metodológico para la revisión de Nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes-N en la agricultura y su aplicabilidad al territorio colombiano

En detalle, se describe a continuación cada una de las etapas:

5.1 Etapa de planeación: Se realiza la recopilación de información, estudios y documentos existentes con relación a Nuevas tecnologías para el manejo eficiente de fertilizantes-N en la agricultura.

- Revisión bibliográfica mediante el uso de tesauros, conectores lógicos y filtros de búsqueda avanzada.

- Se hace uso de diferentes idiomas como el inglés, el francés y el español para la adquisición de mayor cantidad de información en plataformas digitales de base de datos como: ScienceDirect, Scielo, Wiley Online Library, IEEE Xplore, entre otras. Así como en libros, artículos, casos de estudio y tesis de grado.

5.2 Etapa de ejecución/construcción: Las tecnologías encontradas para el manejo eficiente de fertilizantes-N en la agricultura, sobre las cuales se realiza el estudio son: Agricultura de presión, Fertilizantes de liberación controlada y/o lenta SRF e inhibidores de nitrificación, Biofertilizantes fijadores de nitrógeno, Nanofertilizantes y Mejoramiento genético en plantas. Para su respectiva comparación y análisis se realizaron las siguientes actividades:

- Reconocer los efectos que traen las pérdidas por lixiviación y escorrentía de nutrientes nitrogenados sobre el recurso hídrico.
- Revisión general de cada una de las tecnologías mencionadas anteriormente.
- Identificación de las propiedades y/o características de cada una de las tecnologías

5.3 Etapa de culminación: De acuerdo a las comparaciones realizadas y al análisis de las tecnologías existentes para el NUE de FN, se encontró que cada una de ellas ayuda a mitigar los efectos negativos sobre el recurso hídrico, al mejorar la eficiencia en la absorción de nitrógeno; así mismo se identifica que tanto la agricultura de precisión como los fertilizantes de liberación controlada y/o lenta y mejoramiento genético en plantas están siendo usados en Colombia; sin embargo, no a escala masiva. En cuanto al uso de nanofertilizantes es necesario que se promuevan investigaciones aplicadas a cultivos colombianos. Para el logro de los objetivos propuestos se realiza las siguientes actividades:

- Descripción de las tecnologías revisadas, mencionadas anteriormente.
- Evaluar el beneficio de la metodología enfocado en el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados NUE.

- Reconocer el beneficio que trae la aplicación de estas tecnologías para mitigar los impactos generados por los FN sobre el RH.
- Establecer la aplicabilidad de estas tecnologías en cultivos colombianos.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La disponibilidad de agua se está viendo reducida no solo por el cambio climático que afecta el ciclo hidrológico, sino por la aplicación indiscriminada FN que altera el equilibrio natural del nitrógeno, el cual al no ser absorbido por los cultivos contamina fuentes superficiales y subterráneas vitales para el consumo humano, provocando afectaciones en la icnofauna por la eutrofización de aguas superficiales, causando bloqueo en redes de distribución por las algas y las bacterias fotosintéticas, también en salud humana por el aumento en la probabilidad de enfermedades como cáncer y la metahemoglobinemia o síndrome del bebe azul en menores de 5 años.

sin embargo, en Colombia existe un déficit en la cobertura del monitoreo de nitritos y nitratos en aguas superficiales y un nulo monitoreo en aguas subterráneas; lo cual dificulta un proceso de caracterización más acercado a la realidad; además el monitoreo únicamente del agua superficial realizado por las corporaciones autónomas regionales y compilado en el ENA, no diferencia las actividades industriales, imposibilitando medir el impacto directo que tiene la agricultura y el uso de FN en las fuentes hídricas del territorio. Por ende, las personas que se abastecen de agua subterránea en su mayoría población rural es la más vulnerable a sufrir este tipo de enfermedades al consumir aguas no monitoreadas que podrían contener niveles iguales o superiores al límite de 50mg/L de nitratos establecidos por la OMS.

Se hace necesario entonces unir esfuerzos de los diferentes entes autónomos regionales, así como las corporaciones ambientales y universidades o institutos de investigación, como Humboldt, para desarrollar nuevas tecnologías que permitan un monitoreo con mayor cobertura y eficiencia, que ayude a identificar las concentraciones exactas de nitritos y nitratos, tanto en aguas superficiales como subterráneas; siendo esta la

línea base para empezar a implementar nuevas tecnologías para el NUE que contribuyan a una agricultura más sostenible en el campo Colombiano.

Las tecnologías para el NUE se vienen desarrollando desde principio de los años 70, podemos entonces trazar una línea de tiempo iniciando con la identificación de problemas ambientales como la eutrofización en el Programa Cooperación sobre la Eutrofización, de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), realizado en el decenio de 1970 en 18 países; desde allí nacen estrategias de buenas prácticas que buscaban permitir una agricultura sostenible haciendo énfasis en un uso adecuado de FN y su dosificación según el cultivo; pasando luego por tecnologías que permitan una agricultura de precisión que cuente el uso de nanofertilizantes, los cuales mejoran la absorción por parte de la planta por su tamaño y por su liberación controlada; además están los SRF que disminuye las pérdidas de N al retener por más tiempo el nutriente en el suelo, facilitando así su disponibilidad para las plantas y evitando nuevas dosis; también está el uso de biofertilizantes como fijadores de N, que combinados con otros microorganismos, podría llegar a sustituir el uso de fertilizantes sintéticos; hasta finalmente llegar a la biotecnología con el mejoramiento genético en plantas para aumentar la absorción de nutrientes, dichas tecnologías han permitido un aumento en el NUE y con ello un beneficio sobre el recurso hídrico. (ver anexo)

Sin embargo, para llegar a determinar cuáles de estas tecnologías tienen mayor éxito en la aplicación de FN, se deben promover investigaciones en condiciones controladas de cultivo, suelo y técnicas de riego; en donde se puedan aplicar en forma simultaneas las cinco tecnologías descritas anteriormente; para poder realizar un análisis comparativo y determinar cuál de ellas tiene un mejor desempeño en el uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, lo que permitiría determinar cuál de ellas contribuye con la disminución de pérdidas de N en agua, las cuales en la actualidad se encuentra en más del 50%.

La producción de FN de síntesis industrial no está contemplada en el mercado colombiano por sus altos costos energéticos y de infraestructura, que hacen que sea más viable importarlos que producirlos; ante este panorama es importante desarrollar programas

o proyectos de política pública, que incentiven el desarrollo, estudio y aplicación de nuevas tecnologías, en aras de disminuir sus costos de producción y facilitar así el estudio de los mismos en condiciones controladas.

El uso y la aplicabilidad de estas tecnologías en Colombia están controlada por el ICA, quien regula la comercialización de cualquier tipo de fertilizante ya sea producto nacional o importado. Después de un análisis de la estadística de venta anual de fertilizantes se encontró que el FN convencional con mayor consumo es la urea, lo cual evidencia un desconocimiento y aparente inexistente uso de las tecnologías descritas es esta monografía a diferentes escalas; sin embargo fue posible encontrar un bajo consumo de urea prilada la cual es un SCRSF; en este caso particular hay que considerar la baja tasa de actualización de las bases de datos del ICA; pues su índice de retroalimentación data solo hasta el año 2016, imposibilitando determinar el consumo actual de FN asociados a las tecnologías antes descritas. Pese esta ausencia de información, fue posible ahondar en otras fuentes como revistas indexadas y portales noticiosos, las que registran en años más recientes el uso de FN de liberación controlada y biofertilizantes fijadores de nitrógeno.

Por su parte estas mismas fuentes afirman que Colombia está lejos de una nanorevolución agrícola; pero a su vez se encuentran registros sobre la solicitud de patentes ante el ICA, para la importación de nanofertilizantes quelados con posibles usos en 100.000 hectáreas en los próximos años; mientras que el mejoramiento genético en plantas se viene desarrollando desde el año 2000 en cultivos como el maíz, algodón y soya de forma controlada. Se podría decir entonces que en Colombia ya se están aplicando las tecnologías descritas en el estudio sin llegar a un uso masivo dificultando la medición del impacto que podrían llegar a tener sobre el agua.

Sin embargo, según un estudio realizado en china al combinar algunas de estas tecnologías como fertilizantes de precisión o de liberación controlada, técnicas de riego adecuadas y una disminución en la descarga directa de estiércol en los cursos de agua, permitiría mitigar hasta en un 50% la pérdida de N en fuentes de agua superficiales y subterráneas (Lu, y otros, 2019), siendo este un modelo a seguir en Colombia, después de la debida caracterización de las zonas más vulnerables a contaminación por nitratos, que serán

posible una vez sea posible el desarrollo de tecnologías más eficientes en el monitoreo de estos contaminantes en aguas superficiales y subterráneas.

7. CONCLUSIONES

Se hace necesario el desarrollo de nuevas investigaciones sobre la aplicabilidad de estas tecnologías en cultivos de gran importancia para la seguridad alimentaria; así como políticas públicas que regulen su uso; en especial en el área de nanoagricultura y mejoramiento genético, pues aún no se ha determinado el efecto que podrían tener sobre el medio ambiente y la salud humana.

La baja cobertura de monitoreo de la calidad de agua superficial y un nulo monitoreo en aguas subterráneas, imposibilita la medición del impacto que tiene el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados el recurso hídrico para el abastecimiento de población rural del país, por lo tanto se hace necesario reformular las políticas públicas enfocadas al cuidado de la salud tanto de la población como del medio ambiente en esta área, al generar protocolos que contemple los puntos antes mencionados. Se debe tomar en consideración que el estudio de afluentes subterráneos y la medición de precipitados en sus corrientes es compleja, por lo que la destinación de recursos económicos, políticos y académicos para esta tarea debe ser también reforzada.

También hace necesario desarrollar un estudio socioeconómico en el que las variables como el estrato, los métodos de cultivo así como la resistencia al cambio sean tomados consideración, frente al uso e implementación de nuevas tecnologías; lo anterior obedece no sólo a los costos que estas puedan tener sobre los procesos de producción de los campesinos colombianos; sino especialmente a la negativa que ellos puedan presentar, debido a un fuerte arraigo cultural a los métodos tradicionales; pues existen casos como el de los biofertilizantes, que hace uso de organismos microbianos para maximizar su eficiencia; que no son implementados porque se piensa que dichas bacterias pueden ser nocivas para las plántulas y el ser humano.

Por su parte la contaminación continuada del recurso hídrico por el uso excesivo de FN, la cual no va a disminuir en un futuro cercano; pues desde el presupuesto proveniente del fondo público, así como las políticas públicas frente al tema; resultan insuficientes para probar y desarrollar de manera exitosa en Colombia, dichas tecnologías, aun cuando ya existe una gran cantidad de documentación sobre los efectos positivos de las mismas en el mundo.

Pero, la importación de estas tecnologías ya desarrolladas y aplicadas en países como china, Brasil entre otros; con resultados de aumento en la NUE de hasta un 50% como es el caso del uso de nanofertilizantes, o las reducciones en la cantidad de FN aplicado en 65-82% en comparación con los métodos comunes de aplicación de fertilizantes sin disminuir el rendimiento del cultivo gracias a los SCRF o al uso de biofertilizantes, unido con semillas genéticamente modificadas con aprovechamiento eficiente de nutrientes como el nitrógeno contribuirían a mitigar los efectos generados por los vertimientos de lixiviados nitrogenados a fuentes de agua.

Finalmente es válido afirmar que la integración de estas tecnologías en un plan de manejo del nitrógeno en cultivos extensivos de gran importancia para la seguridad alimentaria de Colombia como el arroz, la caña, el café o el maíz permitiría una reducción eficiente de partidas por nitrógeno, aumentando la sostenibilidad de la agricultura; dado que los monocultivos poseen los recursos para su adquisición hace viable la aplicación de una conjunción de estas tecnologías, sin embargo se requieren incentivos estatales, para que sea un método atractivo para los empresarios al disminuir los costos de la importación de las tecnologías; beneficiando al productor al consumidor y al medio ambiente.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (CEPAL), C. E., (FAO), O. d., & (IICA), I. I. (2019). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020*. San José, Costa Rica: Gráfica Litho-offset S.A.
- (IFA), I. F. (2019). *Fertilizer Outlook 2019- 2023*. Montreal (Canada): Production & International Trade, Market Intelligence and Agriculture Services International Fertilizer Association (IFA).
- Afanador, L. (2017). Biofertilizantes: conceptos, beneficios y su aplicación en Colombia. *Ingeciencia*, 2, 65-76. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/331454557_Biofertilizantes_conceptos_beneficios_y_aplicacion_en_Colombia
- Aguilar, Í. (2014). Preparación y evaluación en suelo de. *Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ciencias Químicas*. Bogotá. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia.
- ATSDR, A. p. (2015). *Resumen de salud pública, Nitratos y Nitritos*. Atlanta: Servicio de Salud Pública Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs204.pdf
- Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., Swapnil, P., & Sharma, K. (July de 2020). Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 22, 100-737. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2020.100737>
- Cui, N., Cai, M., Zhang, X., Abdelhafez, A. A., Zhou, L., Sun, H., . . . Zhou, S. (2020). Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications. *Global Ecology and Conservation*, 1-12.
- Daza, M., Ladino, G., & Urrutia, N. (2018). Agronomic and environmental benefits of nitrogen fertilizers sources in *Ocimum basilicum* L. *DYNA*, 294-303. doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.69103>
- Decología.info. (25 de Mayo de 2020). *Decología.info*. Obtenido de Decología.info: <https://decologia.info/medio-ambiente/eutrofizacion/>
- Eurotrending. (Febrero de 2020). *ACIS, Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas*. Obtenido de ACIS, Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas: <https://acis.org.co/portal/content/NoticiaDelSector/llega-colombia-la-nanotecnolog%C3%ADa-al-servicio-de-la-agricultura#:~:text=La%20nanotecnolog%C3%ADa%20permite%20controlar%20y,entre%201%20y%20100%20nm.&text=Por%20los%20tama%C3%B1os%20nanom%C3%A9tricos%2>
- FAO, O. d. (22 de Septiembre de 2015). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) : <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/266126/>
- FAO, O. d. (23 de Mayo de 2020). *Banco mundial*. Obtenido de Banco mundial: https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.CON.FERT.ZS?end=2016&locations=CO-BR-CN-EC-US&name_desc=false&start=2002&view=chart

- Florindo, T., Bom, G., Favarini, C., & Troller, A. (2020). Multicriteria decision-making and probabilistic weighing applied to. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118362. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118362>
- Fuenmayor, C. (2017). La nanotecnología y los retos de sostenibilidad del sistema agroalimentario. *Salud Bosque*, 7, 57-67. doi:<http://dx.doi.org/10.18270/rsb.v7i2.2193>
- Guo, H., White, J. C., Zhenyu, W., & Xing, B. (December de 2018). Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 6, 77-83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.009>
- Gutierrez, D., Ruiz, R., & xoconostle, B. (2015). Estado actual de los cultivos genéticamente modificados, en Mexico y su contexto internacional. *Estado actual de los cultivos genéticamente modificados, en Mexico y su contexto internacional*. (C. d. Avanzados, Recopilador) Obtenido de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/publicaciones/Estado-actual-de-los-cultivos.pdf>
- ICA, I. c. (2016). *Comercialización de fertilizantes y acondicionadores del suelo*. Bogotá: Diagramación, armada, fotomecánica, impresión y encuadernación. Obtenido de <https://www.ica.gov.co/getdoc/bc02bf1f-68b4-4d82-b776-722e261b4ca8/estadisticas.aspx>
- IDEAM, I. d. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Panamericana Formas e Impresos S.A. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/023858.html>
- Kant, S. (February de 2018). Understanding nitrate uptake, signaling and remobilisation for improving plant nitrogen use efficiency. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 74, 89-96. doi:<https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.08.034>
- Kazakis, N., Matiatos, I., Ntona, M.-M., Bannenberg, M., Kalaitzidou, K., Kaprara, E., . . . Voudouris, K. (2020). Origin, implications and management strategies for nitrate pollution in surface and ground waters of Anthemountas basin based on a $\delta^{15}\text{N-NO}_3$. *Science of the Total Environment*, 724, 138211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138211>
- Kour, D., Lata Rana, K., Nath Yadav, A., Yadav, N., Kumar, M., Kumar, V., . . . Kumar Saxena, A. (2020). Microbial biofertilizers: Bioresources and eco-friendly technologies for agricultural and environmental sustainability. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 101-487. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>
- Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., & Kessel, V. C. (2005). Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *Advances in Agronomy*, 87, 85-156. doi:[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8)
- Leguizamon, J., Vela, A., Arias, M., & Cifuentes, L. (2018). Panorama general de los organismos genéticamente modificados en Colombia y en el mundo: Capacidad nacional de detección. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 20. doi:<http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n2.77080>
- Lira, R., Menézas, B., De los Santos, G., & Vera, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura sustentable. *Acta Universitaria*, 28, 9-24. doi:<http://dx.doi.org/10.15174/au.2018.1575>

- López, M. (2 de Julio de 2019). *MERCADOS*. Obtenido de *MERCADOS*: <https://www.revistamercados.com/usos-de-los-fertilizantes-de-liberacion-controlada-en-agricultura/>
- Lu, J., Bai, Z., Chadwick, D., Velthof, G. L., Zhao, H., Li, X., . . . Ma, L. (2019). Mitigation options to reduce nitrogen losses to water from crop and livestock production in China. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 40, 95-107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.10.002>
- Luc, M., & Heffer, P. (2007). Desarrollo tecnológico en el uso de fertilizantes. *Informaciones agronómicas*, 6-11. Obtenido de [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6EFA06CD172299B6852579A3006CBAE2/\\$FILE/Desarrollo%20tecnologico%20en%20el%20uso%20de%20fertilizantes.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6EFA06CD172299B6852579A3006CBAE2/$FILE/Desarrollo%20tecnologico%20en%20el%20uso%20de%20fertilizantes.pdf)
- Luna, V., & Sergio, A. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San Juan de Aragón. *TIP*, 17, 32-55. doi:[https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3)
- Lyua, X., Wangb, T., Ma, Z., Zhao, C., Siddique, K. H., & Ju, X. (2019). Enhanced efficiency nitrogen fertilizers maintain yields and mitigate global. *Field Crops Research*, 244, 107-624. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107624>
- Moreno, s. (S.F). Nitrógeno y actividades humanas. *LA CASCADA DEL NITRÓGENO OCASIONADA POR ACTIVIDADES HUMANAS*. México. Obtenido de Instituto de Ecología UNAM.
- Ongley, E. (1997). Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55). En E. Ongley, *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55)*. Burlington, Canadá: GEMS/Water Collaborating Centre, Canada Centre for Inland Waters.
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). Glosario hidrológico internacional. En O. M. Mundial, *Glosario hidrológico internacional* (pág. p. 685).
- Orjuela, Y. (2 de Abril de 2020). Nanotecnología, una receta para cultivos más sanos. *El Tiempo*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/nanotecnologia-en-cultivos-de-boyaca-480406>
- Pérez, L., Bolívar, H., & Díaz, A. (2017). Biofertilizantes en Colombia. En H. Estrada, H. Saumett, M. Iglesias, M. Bahamón, A. Cáseres, R. C, & A. Díaz, *Productos de confitería nutracéutica. Una opción empresarial para cultivadores de frutas y hortalizas* (págs. 179-222). Barranquilla: Universidad Simon Bolívar. Obtenido de <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/publicaciones/Estado-actual-de-los-cultivos.pdf>
- Rudek, J., Aneja, V., & Abrol, Y. (2017). 3 - Concepts for Considerations in the Design of an Indian Integrated Nitrogen Assessment. *The Indian Nitrogen Assessment- Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*, 29-43. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-811836-8.00003-3>
- Saavedra, S. (2018). Fertilización nitrogenada a tasa variada en seis campos de caña de azúcar: hacia un manejo ambiental sostenible bajo el concepto de agricultura de precisión. Palmira, Valle de Cauca, Colombia: UNAL, Repositorio institucional . Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69043>
- Sánchez, J. (2017). Mercado de productos agrícolas ecológicos en Colombia. *Suma de Negocios*, 8, 156-163. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sumneg.2017.10.001>

- Schütz, L., Gattinger, A., Meier, M., Müller, A., Boller, T., Mäder, P., & Mathimaran, N. (2018). Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization—A Global Meta-analysis. *Plant Sci.* doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02204>
- SMART, F. m. (S.F). *SMART, Fertilizer mayament*. Obtenido de SMART, Fertilizer mayament: <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/fertilizer-solubility/>
- Tewatia, R., & Chanda, T. (2017). Trends in Fertilizer Nitrogen Production and Consumption in India. *The Indian Nitrogen Assessment- Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*, 45-56. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811836-8.00004-5>
- Wei, H., Wang, H., Chu, H., & Li, J. (15 de July de 2019). Preparation and characterization of slow-release and water-retention fertilizer based on starch and halloysite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 1210-1218. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.183>
- WWAP, P. M., & ONU, O. d. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en*. París: UNESCO-Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Obtenido de <file:///C:/Users/Usuario/Dropbox/Especializaci%C3%B2n%20GA/SEMINARIO%201/MONOGRAFIA/Articulos%20estado%20del%20arte/Informe%20calidad%20del%20agua%20unesco%202018.pdf>
- Xiao, Y., Peng, F., Zhang, Y., Wang, J., Zhuge, Y., Zhang, S., & Gao, H. (10 de Octubre de 2019). Effect of bag-controlled release fertilizer on nitrogen loss, greenhouse gas emissions, and nitrogen applied amount in peach production. *Journal of Cleaner Production*, 234, 258-274. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.219>

ANEXO A. Resumen tecnologías para mejorar el NUE de FN y su aplicabilidad en territorio colombiano.

Tecnología para el NUE	Propiedades FN	Métodos de Aplicación agronómica y cultivos	Beneficio enfocado en el NUE	Beneficio en el recurso Hídrico	Aplicación en Colombia	Referencia
Agricultura de precisión	urea (N 46%) [N] mezcla de urea y 30% de abono orgánico granular: C 21%, N 2.3%, P 2.1% [ON]	Análisis de agua superficial drenada y suelo tomado a una profundidad de 15 cm antes de la cosecha de arroz en campo para determinar las concentraciones [NH ₄ ⁺ -N], [NO ₃ ⁻ -N].	Los contenidos de TN y NH ₄ ⁺ -N en N300 fueron generalmente más altos que en ON300 y N200 fue más alto que ON200. Esto podría atribuirse a la lenta liberación de N en el suelo tras la descomposición de la materia orgánica.	Las concentraciones de TN y NH ₄ ⁺ -N generalmente aumentaron significativamente junto con la tasa de fertilizante N. El uso de fertilizante orgánico presenta una liberación más lenta disminuyendo las pérdidas de N	Se registra aplicación de urea y fertilizantes granular orgánico, según ICA.	(Cui, y otros, 2020)
Fertilizantes SCRSF	El xantano NPK	Ensayos de liberación en agua y en suelo a escala de laboratorio.	Tardando hasta tres veces más tiempo para liberar el 50% de nutrientes en la formulación en comparación con las formulaciones basadas en los polielectrolitos y xantano-almidón.	La incorporación de los fertilizantes en las matrices poliméricas, retarda los procesos de lixiviación, disminuyendo las dosis por cultivos, mitigando la contaminación de acuíferos.	Se registra aplicación de urea prilada con un mínimo consumo de 350Kg para el año 2015, según el ICA. Aún se encuentra en fase de estudios a escala	(Aguilar, 2014)

					de laboratorio el análisis de su eficiencia en condiciones controladas según estudios colombianos.	
Fertilizantes de Liberación Lenta y Retención de agua a base de urea Urea de SRF Urea de SRF cubierto de almidón y halloisita [$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$, HNT]	Comportamiento de liberación de urea, SRF y SRF con HNT en agua destilada y suelo.	El uso de HNT disminuye la velocidad de liberación del fertilizante, permitiendo una absorción más prolongada por los cultivos, bajando el número de aplicaciones.	El porcentaje de liberación de urea pura sin portadores, urea de SRF y urea de SRF con HNT en agua destilada alcanzaron el 98%, 50.9% y 43,1% en 2 h. Debido a que los HNT poseen un área de superficie específica alta, su existencia puede limitar la difusión de urea en el agua, mejorando así la propiedad de liberación sostenida de fertilizante, en el suelo.	No se registra uso de esta tecnología en cultivos, aún se encuentra en estudios de laboratorio.	(Wei, Wang, Chu, & Li, 2019)	
Fertilizante NPK empacado en bolsas de papel y polietileno.	Uso en suelo en cultivo de durazno a nivel de campo.	El uso de este SCRF redujo la cantidad de fertilizantes nitrogenados aplicados en un	El fertilizante de SCRF por bolsa disminuye la lixiviación de nitrógeno, la volatilización del	Se podría aplicar en cultivos de durazno similares a los del estudio.	(Xiao, y otros, 2019)	

			65-82% en comparación con los métodos comunes de aplicación de fertilizantes sin disminuir el rendimiento del durazno.	amoníaco del suelo del huerto de duraznos.		
Biofertilizantes fijadores de N	Rhizobiaceae Azolla Azotobacter Acetobacter Cianobacterias o las algas verdeazuladas Azospirillum	Biofertilizantes fijadores de nitrógeno: <ul style="list-style-type: none"> • simbiótico • de vida libre • simbióticos asociativos 	Suministro suficiente de nitrógeno para las legumbres sin utilizar Produce promotores de crecimiento como IAA, giberelinas y citoquininas.	La inoculación de Azotobacter y Pseudomonas más la fertilización disminuyeron la aplicación de fertilizantes químicos en un 25–50% en el campo, beneficiando de forma directa al RH	Se puede aplicar en cultivos de arroz, legumbres, caña de azúcar, café Los efectos ventajosos de la inoculación con cianobacterias se han reportado en varios cultivos como arroz, trigo, cebada, chile, algodón, lechuga, maíz, avena, rábano, tomate.	(Kour, y otros, 2020)
Nanofertilizantes	Caolinita intercalada en el uréio encapsulada en resina	Ensayos en macetas y suelo condición invernadero y campo.	Mayor producción, 8,2% aumento de rendimiento, aumento en un 30% en la eficiencia del uso	El aumento en el uso eficiente de FN disminuye las pérdidas por escorrentía o lixiviación a fuentes hídricas.	Existen pocos estudios de aplicaciones a nivel de cultivos (Campos de arroz)	(Guo, White, Zhenyu, & Xing, 2018)

	<p>Nanohíbridos de urea e hidroxiapatita Urea-modificada HA NPs encapsulada en montmorillonita</p> <p>Hidroxiapatita recubierta de urea (U-HA)</p>		del N y del 50% en macetas.			
	NanoTech	En el momento ya están registrados 6 fertilizantes y se desarrollaron los estudios de suelos	<p>A los 15 días de la primera aplicación empezamos a notar el cambio en las plantas, tonos verdes más intensos, basales nuevos y mejor calibre.</p> <p>Reducción de aplicación de fertilizante entre 15-35%</p>	aplicaba un fertilizante químico cuatro o cinco veces por semana. Pasaron a hacerlo una sola vez al mes minimizando las afectaciones al recurso hídrico.	<p>“Todavía estamos en una escala de laboratorios, y existe cierta dificultad para producirlo en mayor escala”.</p> <p>como las fresas y los arándanos, así como también en cultivos como la cebolla larga de gran demanda en nuestro país, hortalizas, papa y café entre otros, incluyendo cultivos hidropónicos.</p>	<p>(Eurotrending, 2020).</p> <p>(Orjuela, 2020)</p>

Mejoramiento genético en plantas PGM	Intrangénicos, Cisgénicos Transgénicos	Uso en cultivos en campo como algodón, maíz, soya y arroz.	Mejores comportamientos frente a los cambios climáticos, aprovechamiento eficiente de nutrientes y mayores desempeños frente al consumo de agua	consumo eficiente disminuyendo significativamente las pérdidas de fertilizantes y contaminación en las fuentes de agua superficiales y subterránea.	Aplicación en 100.000 hectareas de maíz y algodón Aprobación de 162 autorizaciones para introducción de especies GM.	(Gutierrez, Ruiz, & xoconostle, 2015)
---	--	--	---	---	---	---------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.