

Biofertilización nitrogenada como aporte a la sustentabilidad de la agricultura colombiana

Nitrogenous biofertilization as a contribution to sustainability of the Colombian agriculture

Biofertilização nitrogenada como aporte de sustentabilidade na agricultura colombiana

Sandra Patricia Montenegro Gómez¹ & Silvia Eugenia Barrera Berdugo²

¹Licenciada en Biología y Química. Especialista en manejo y conservación de suelos y aguas. Magister en ciencias agrarias, énfasis suelos. Doctora en Ciencias área de concentración microbiología Agrícola. ²Bióloga. Magister en Ciencias, área de concentración Suelos y nutrición de plantas. Estudiante de doctorado en Ciencias, área de concentración Suelos y nutrición de plantas Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.

¹Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología- CIAB. Dosquebradas. Risaralda. Colombia.

²Departamento de Ciencia del Suelo. Escuela Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidad de São Paulo- Brasil.

¹sandra.montenegro@unad.edu.co, ²sberdugo@usp.br

Resumen

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante en términos de consumo de fertilizantes. La excesiva adición de N a través de fertilizantes y sus efectos nocivos en el ambiente es preocupación de científicos, ambientalistas, gobiernos, industria y cuerpos internacionales. El fortalecimiento en investigación y aprovechamiento de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) gana espacio como alternativa de agricultura sustentable a nivel global. En esta investigación se encontró que la interacción de bacterias fijadoras de nitrógeno (diazotróficas) con diversos cultivos ha sido tema de investigación a nivel mundial, debido al potencial biotecnológico evidenciado en el aumento de la productividad y posibilidad de reducción en costos tanto de producción como ambientales. En Colombia poco uso se hace de biofertilizantes nitrogenados, de acuerdo al DANE, 80% de agricultores usan fertilizantes de síntesis química, principalmente urea. Brasil, gran consumidor

de este fertilizante y de alta producción agrícola, hace grandes esfuerzos de inversión en ciencia y tecnología enfocados hacia la producción de biofertilizantes nitrogenados, logrando significativa disminución en costos de producción principalmente en soya, donde el ahorro de fertilizantes de síntesis química ha sido del orden de 10.3 billones de dólares anuales (EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Este centro investigativo plantea intensificar la investigación científica para en 2020 suministrar biofertilizantes que reduzcan los niveles de fertilizantes de síntesis química. Se concluye que este camino podría iniciarse en Colombia como una posibilidad para el crecimiento sustentable del agro, contextualizado en cultivos de interés para la economía colombiana.

Palabras clave: ciclo del nitrógeno, diazotróficos, fijación biológica de nitrógeno, biofertilización.

Abstract

Nitrogen (N) is the most important nutrient in means of fertilizer consumption. The excessive addition of N through fertilizers and its adverse effects into the environment is a scientists, environmentalists, governments, industry and international institutions concert. The strengthening in research and the exploitation of biological nitrogen fixation (BNF) gains space as an alternative for efficient agriculture in a global level. In this investigation it was found that the interaction of nitrogen-fixing bacteria (diazotrophic) with divers crops have been a subject of investigation in a global level, due to biotechnological potential showed in the increase of productivity and the possibility of reduce production and environmental costs as well. In Colombia, Nitrogenous biofertilizers are barely used, according to DANE, 80% of farmers use chemical fertilizers, mostly urea. Brazil, a great consumer of this fertilizer and with a high agricultural production, makes big investment efforts in science and technology focused into the production of nitrogenous biofertilizers, achieving a meaningful reduction in production costs specially in soya, where the saving is chemical fertilizers has been of the order of 10.3 billions of dollars per year (EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). This research center contemplates to intensify the scientific investigation for in 2020 supplying biofertilizers that reduce the levels of chemical fertilizers. It is concluded that this road can be initiated in Colombia as a possibility to the efficient growth of agriculture, contextualized in crops of interest to the Colombian economy.

Key-words: Nitrogen cycle, diazotrophic, biological nitrogen fixation, biofertilization

Resumo

O nitrogênio (N) é o nutriente mais importante em termos de consumo de fertilizantes. A excessiva adição de N através de fertilizantes e os seus efeitos nocivos sobre o ambiente é preocupação dos cientistas, ambientalistas, governos, indústria e organismos internacionais. Reforço da investigação e utilização de fixação biológica de nitrogênio (FBN) hoje a ganha terreno como uma alternativa para a agricultura sustentável em todo o mundo. Esta pesquisa constatou que a interação de bactérias fixadoras de nitrogênio (diazotróficas) com várias culturas tem sido objeto de investigação no mundo todo, devido ao potencial biotecnológico evidenciado pelo aumento da produtividade e redução de custos de produção e ambiental. Na Colômbia, pouco é feito uso de biofertilizantes de nitrogênio, de acordo com o DANE, 80% dos agricultores usam fertilizantes químicos sintéticos, especialmente ureia. Brasil, um dos maiores consumidores de fertilizantes e de alta produção agrícola, faz grandes esforços para investir em ciência e tecnologia voltada para a produção de biofertilizantes nitrogenados, obtendo redução significativa dos custos de produção, principalmente da soja, onde a poupança em fertilizantes da síntese química está por volta dos 10,3 bilhões anualmente. A EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária propõe intensificar a investigação científica para fornecer bio-fertilizantes e se projeta para o ano 2020 para reduzir os níveis de fertilizantes químicos sintéticos. Conclui-se que este caminho poderia se dar início na Colômbia como uma possibilidade para o crescimento sustentável na agricultura, incluindo culturas contextualizadas no interesse da economia nacional.

Palavras-chave: ciclo do nitrogênio, diazotróficas, fixação biológica de nitrogênio, Biofertilização

Introducción

El proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN) es la principal forma de entrada del nitrógeno (N) en un ecosistema y es mediado por microorganismos diazotróficos simbióticos o de vida libre. En la naturaleza, los compuestos nitrogenados son clasificados como nitrógeno-no reactivo (N) y nitrógeno reactivo (Nr), el N no reactivo es el N_2 o nitrógeno atmosférico y el Nr es toda forma biológica, fotoquímica y radioactivamente activa de compuestos nitrogenados presentes en la atmósfera y biosfera, incluyendo las formas orgánicas reducidas (ej. Amonio $[NH_3]$), formas oxidadas inorgánicas (ej. óxido de nitrógeno $[NO_x]$, ácido nítrico $[HNO_3]$, óxido nitroso $[N_2O]$, nitrato $[NO_3^-]$ y nitrito $[N_2O^-]$), y compuestos orgánicos (ej. urea, aminas, proteínas y ácidos nucleídos) (Galloway *et al.*, 2008).

El N ocupa la cuarta posición como elemento más común en los tejidos vivos, posicionado después del oxígeno, del carbono y el hidrógeno. Es un componente esencial de las proteínas, ácidos nucleicos, clorofila y otras importantes moléculas orgánicas. Sin embargo el N_2 , que compone cerca del 78% de la atmósfera, no es asimilable por eucariotas (incluyendo las plantas, ni por la mayoría de procariotas (Vitousek *et al.*, 1997). Los procesos naturales de generación de Nr son limitados solo a descargas eléctricas y bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) simbióticas o de vida libre. En consecuencia, entre otras actividades antropogénicas la excesiva adición de Nr a través de fertilizantes y sus efectos nocivos en el ambiente ha generado en los últimos años preocupación y la necesidad de limitar la perturbación del ciclo natural del N, por lo cual su gestión sostenible está atrayendo mayor atención de los científicos, ambientalistas, gobiernos, industria, así como cuerpos internacionales.

La acumulación de Nr puede ser limitada por la aplicación más racional y eficiente de fertilizantes nitrogenados en la agricultura (Abrol, Pandey, Raghuram & Ahmad, 2012) y buenas prácticas agrícolas que promuevan la FBN. Un ejemplo exitoso es el cultivo de soya en Brasil, el segundo productor mundial de este cultivo, donde la mayor parte del N es suministrado por FBN. Datos registrados por Oliveira,

Castro, Klepker & Oliveira (2010) indican que se obtiene un rendimiento promedio de 3244 kg ha⁻¹ de materia seca total a partir de 228 kg N ha⁻¹ de los cuales 194 provienen de FBN simbiótica. Otro cultivo de gran importancia en este país es el maíz, en el cual también existen reportes de economía en fertilización nitrogenada entre 30 y 50 kg N ha⁻¹ por FBN no simbiótica (Fancelli, 2010). Estos hallazgos y los de FBN en otras plantas son el resultado de ardua investigación científica.

La producción de biofertilizantes a partir de bacterias diazotróficas es la principal alternativa de uso de fertilizantes nitrogenados solubles, favoreciendo el crecimiento de las plantas debido al proceso de FBN en sí, así como por otros mecanismos de promoción de crecimiento vegetal, sin embargo, a pesar de que la simbiosis *Rhizobium*-leguminosas es eficiente en promover el crecimiento vegetal, la inoculación de bacterias diazotróficas en gramíneas ha mostrado diferentes resultados, debido principalmente a la baja eficiencia e incompatibilidad entre los actuales inoculantes bacterianos en plantas, no obstante, una posibilidad para mejorar la eficiencia de la FBN en gramíneas es la aplicación de bacterias epifitas, bacterias encontradas sobre la superficie de la parte aérea de la planta, con menos selectividad en relación a las bacterias endófitas (Cassetari, 2014).

En Colombia poco uso se hace de biofertilizantes nitrogenados, la urea es el fertilizante más utilizado por los agricultores (DANE, 2012); este fertilizante es costoso y su uso excesivo además de altos costos económicos impacta negativamente el ambiente, comprometiendo la sostenibilidad y sustentabilidad agrícola; por tanto se requiere adoptar medidas, básicamente en investigación científica, encaminadas hacia la producción de biofertilizantes nitrogenados y así contribuir significativamente en el crecimiento sostenible del agro colombiano.

Fertilización nitrogenada de síntesis química y efecto en costos de producción para los agricultores colombianos

N es el nutriente más importante en términos de consumo de fertilizantes, su deficiencia da lugar a graves pérdidas de rendimiento y bajo contenido

de proteínas en los cultivos (IFA 2007). Es un nutriente de poca eficiencia al momento de su aplicación y tiene varias posibilidades de pérdidas, como la volatilización y el arrastre por el agua. Los altos costos de fertilizantes nitrogenados, adicionalmente a los impactos ambientales deben alentar a los productores a evaluar críticamente su programa de manejo de N, incluyendo las fuentes y tasas de fertilización ya que las plantas difieren en sus requerimientos nutricionales y responden a la fertilización según las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Para el crecimiento óptimo de las plantas, los nutrientes deben estar disponibles en cantidades suficientes y equilibradas (Chen, Rekha, Arunshen, Lai & Young, 2006), este es un factor crítico en la agricultura colombiana ya que sólo el 40% de los productores realizan el análisis de suelos para optimizar el uso de las cantidades requeridas de estos productos (DANE, 2012). A esto se suma que la infertilidad del suelo, es el mayor limitante del rendimiento de cultivos en todo del mundo y especialmente entre los agricultores de escasos recursos de naciones en desarrollo, por tanto, es necesario un manejo integrado de fertilidad que abarque una estrategia para el aprovechamiento de nutrientes basada en conservación de los recursos naturales, FBN y aumento de la eficiencia de los insumos (Vlek & Vielhauer, 1994).

Para el caso puntual de Colombia, se ha evidenciado que aproximadamente el 80 % de los productores agrícolas hacen aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, de los cuales el más empleado es la urea; el uso se ha venido incrementando con el tiempo (DANE, 2012) y entre las razones de este incremento está la falta de consideración de las condiciones del suelo respecto a la presencia de N, generando aplicaciones indiscriminadas con consecuencias en el incremento de costos de producción y graves daños ambientales.

Costos ambientales asociados a la fertilización nitrogenada

La falta de N puede generar absorción reducida y uso ineficiente de otros nutrientes en la planta

(fósforo, potasio, azufre, etc.). Al no ser absorbidos por el cultivo, algunos de estos nutrientes pueden perderse del suelo por lixiviación o erosión y en consecuencia causar problemas de acidificación o eutrofización (Figura 1). La deposición ácida se debe principalmente a las emisiones antropogénicas de dióxido de azufre (SO_2), NO_x y NH_3 , que dañan los ecosistemas sensibles al ácido en escala regional a continental; en particular, los bosques y lagos de agua dulce son sensibles a la acidificación. Por su parte, las emisiones de amoníaco que se depositan en los cuerpos de agua y lixiviados de NO_3 de los suelos agrícolas en las aguas superficiales son algunas de las principales fuentes antropogénicas de N que contribuyen a la eutrofización de los recursos acuáticos (IFA, 2007).



Figura 1. Principales efectos ambientales negativos a nivel de agua, aire y suelo causados por fertilizantes nitrogenados no asimilados por las plantas

Aunque es ampliamente aceptado que la aplicación de fertilizantes nitrogenados tiene decisiva contribución en tratar de igualar el ritmo de producción de alimentos con el crecimiento de la población humana en las últimas décadas, también existe un consenso de que esto ha sido a un alto costo ambiental que ya no es sostenible, por lo tanto, la FBN debe ser mejor aprovechada como una tecnología más sostenible al reducir efectos no deseados de la fertilización nitrogenada de síntesis química (Olivares, Bedmar & Sanjuan, 2013). La FBN se fundamenta en el proceso realizado por bacterias fijadoras diazotróficas, en el cual el N atmosférico pasa a ser asimilable a través de su reducción a forma amoniacal. Esta es una cualidad atribuida a la enzima nitrogenasa

(reacción representada en la ecuación (1), presente en un grupo selectivo de bacterias las cuales se han venido identificando a través de técnicas de aislamiento bacteriano basadas en métodos dependientes y no dependientes de cultivo en acompañamiento con otras técnicas que permiten evaluar la actividad de la enzima (Actividad de reducción de etileno-ARA y/o abundancia isotópica ^{15}N).



La biofertilización nitrogenada ha venido ganando importancia en el campo agrícola no solo por beneficios económicos en disminución de gastos en fertilización, sino también por los beneficios en el sostenimiento del recurso suelo a través del incremento de la actividad de la microbiota edáfica.

Biofertilización nitrogenada: una tendencia global

La interacción de bacterias diazotróficas con diversos cultivos ha sido tema de investigación a nivel mundial, debido al potencial biotecnológico evidenciado en el aumento de la productividad y posibilidad de reducción en costos de producción al disminuir el uso de abonos nitrogenados de síntesis química y consecuentemente mayor conservación de los recursos ambientales (Moreira, DA Silva, Nóbrega & Carvalho, 2010). Diversos relatos de los beneficios de bacterias diazotróficas abren la posibilidad del aprovechamiento de la FBN, para optimización de inóculos eficientes y específicos para diferentes cultivos.

Durante años se ha reconocido la mayor eficiencia en FBN por parte de bacterias simbióticas en convivencia con plantas leguminosas, sin embargo la FBN en plantas no leguminosas se ha tornado en un gran desafío para la actividad agrícola durante los últimos años, gracias a que han sido descubiertos nuevos géneros de bacterias asociadas a caña de azúcar (Dobereiner, 1992), destacándose: *Azospirillum* spp., *Herbaspirillum rubrisubalbicans*, *Gluconobacter diazotrophicus*, *Burkholderia*

silvatlantica, (Baldani *et al.*, 1986; Calvacante & Dobereiner, 1988; Baldani *et al.*, 1996; Reis *et al.*, 2000; Reis, Baldani, Baldani & Dobereiner, 2000; Oliveira, Urquiaga, Döbereiner & Baldani, 2002; Perin, Baldani & Reis, 2004). Existen relatos indicando que bacterias diazotróficas no simbióticas sustituyen 60% de las necesidades de N en caña de azúcar, aproximadamente 200 kg de N/ha (Urquiaga, Cruz & Boddey, 1992). También el inóculo de *Bacillus* spp. como biofertilizante mostró efectos sobre el crecimiento de plantas a través de la síntesis de hormonas promotoras de crecimiento en plantas (Amer & Utkheda, 2000).

En el cultivo de arroz, las cianobacterias exhiben varias características útiles como inoculantes (Chingkhunba *et al.*, 2012). Por ejemplo en la India se han tenido grandes avances en tecnología basada en biofertilizantes conformados por cianobacterias y se ha demostrado que esta tecnología puede ser un medio poderoso para enriquecimiento en la fertilidad del suelo y mejorar el rendimiento en cultivo de arroz, actualmente ellos realizan rigurosos estudios de campo con la finalidad de desarrollar inóculos específicos a nivel regional (Upasana & Sunil, 2004).

Nuevas investigaciones han propuesto el uso de un polímero de alginato como soporte para la aplicación de inoculantes. Polímeros de alginato son sustancias biodegradables de bajo costo que promueven el encapsulamiento de células, liberándolas en el ambiente, después de la degradación del material y protegiéndolas contra estrés ambiental, favoreciendo la multiplicación y supervivencia de las células, cuando son aplicados al suelo (Bashan, Hernandez, Leyva & Bacilio, 2002). Un inóculo compuesto por una mezcla de estirpes de bacterias diazotróficas, carboximetilcelulose y almidón fue evaluado sobre la producción de caña de azúcar. Los tratamientos con inoculantes (mezcla de bacterias diazotróficas y polímeros) aumentaron la productividad de las variedades RB72454 y RB867515 después de 11 meses de inoculación, sin diferenciarse del control que recibió

fertilización con N mineral (Silva *et al.*, 2009), mostrándose como una técnica promisor. En un experimento llevado a cabo en casa de vegetación en plántulas de caña de azúcar, la inmovilización de células bacterianas en micro-esferas de alginato y posterior inoculación en el suelo, presentó incrementos significativos de masa seca en la parte aérea, raíces y concentración de N en fases tardías de desarrollo de la planta, cuando fue aplicado hasta el 50% de la fertilización nitrogenada recomendada para este cultivo (Cassetari, 2014).

La inoculación de bacterias diazotróficas no es un tema reciente, los biofertilizantes se introdujeron en el mercado en 1895 por Nobbe y Hiltner quienes multiplicaron en laboratorio un cultivo de bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Rhizobium* y llamaron al biofertilizante Nitragin (Raghuwanshi, 2012). En la actualidad existe una gran cantidad de biofertilizantes nitrogenados, algunos de ellos de alto reconocimiento a nivel mundial (Tabla 1), esta es una adopción positiva que conlleva hacia una agricultura menos dependiente de insumos agrícolas y por lo tanto de menor polución.

Tabla 1. Biofertilizantes nitrogenados comercialmente disponibles, su manufactura y cultivos beneficiados por asociación microbiológica

| Producto | Nombre de la empresa productora | Microorganismo usado | Cultivo beneficiado |
|---------------------|--|----------------------|------------------------|
| Nitragin TM | Nitragin sales Corp N Wisconsin, 53209 | | |
| Rhizocote | Coated Seed Ltd, Nelson, New Zeland | <i>Rhizobium</i> | Soya |
| Nodosit | Uniob Chemiques S.A Belgium | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| Rhizonit | Phylaxia Allami Budapest, Hungary | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| Nitrazina | Wytwarnia Walcz Poland | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| N-germ | Laboratoire de Microbiologie, France | <i>Azotobacter</i> | Cereales y vegetales |
| Tropical inoculants | Tropical inoculants | BGA | Arroz |
| Nodulaid | Brisbane, Queensland Agricultural Lab. New South Wales, UK | <i>Azotobacter</i> | Arroz y trigo |
| Azotobacterin | Tashkent laboratories Moscow | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| Nodion | Indian Organic Chems. Ltd. Mahew Mahal, Bombay | <i>Azotobacter</i> | Vegetales y cereales |
| Azoteeka | Bacifit, 25 Nawal Kishore Rd. Lucknow | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| Agro-teeka | National Fertilizers and Chemicals 11, ind area-II, Ramdabar, Chandigarh | <i>Azotobacter</i> | Trigo, arroz, maíz, té |
| Rhizoteeka | | <i>Azotobacter</i> | Caña de Azúcar, papa |
| Nitrogeron | Microbes India 87.Lenin Savabe, Calcuta | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |
| | Root nodne Pvt. Ltd. Australia | <i>Rhizobium</i> | Leguminosas |

Fuente: (Bhattacharjee & Dey, 2014)

Expectativas de biofertilización nitrogenada en Colombia

Más del 60% de los fertilizantes utilizados en el mundo corresponde a productos nitrogenados, siendo la urea el de mayor demanda. En concor-

dancia con la tendencia de precios en el 2014 este agroquímico disminuyó 13% a nivel mundial, sin embargo en Colombia la disminución no fue relevante alcanzando sólo un 5%. Adicionalmente, la Sociedad de Agricultores de Colombia-SAC reportó un incremento en el precio del bulto,

elevando costos de producción, los cuales por cuenta de insumos agrícolas oscilan entre 30% y 50%. Esta situación genera limitación de competitividad y adicionalmente influye en el incremento de la pobreza, la cual se concentra desproporcionadamente en el sector rural abarcando el 64% del 45% del total de la pobreza nacional. Por su parte, países como Brasil, Perú y Chile en la última década han participado del dinamismo del comercio mundial de productos agrícolas por el marcado crecimiento de su producción y exportaciones agrícolas (Figura 2A y 2B) aumentado por encima de las exportaciones mundiales. Países como Colombia y México han crecido por debajo del promedio. Dentro de ese mismo grupo de países el desempeño de la producción agrícola muestra un panorama aún más desalentador para Colombia, ubicada por debajo del promedio mundial, e incluso por debajo de México, aclarando que este último país sostiene su producción agrícola en mayor medida a través del mercado doméstico. (Gómez *et al.*, 2011).

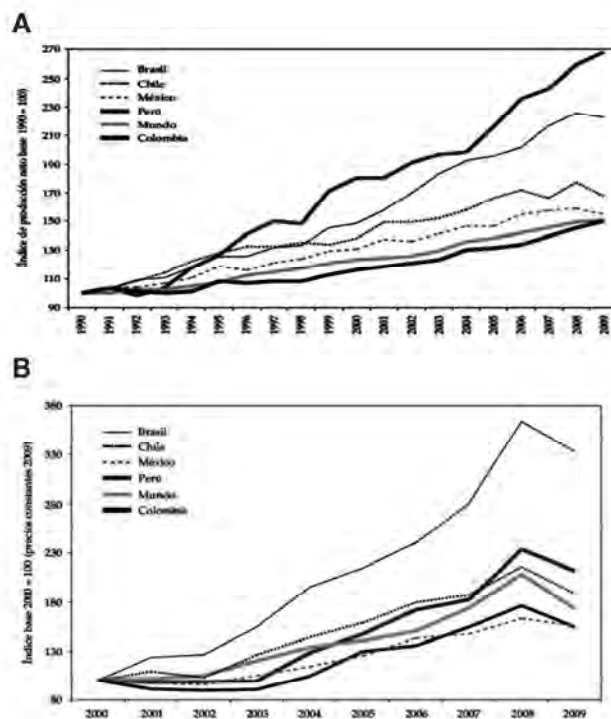


Figura 2. Índices de producción (A) y exportación (B) agrícola mundial y algunos países latinoamericanos entre 1990 y 2009. Adaptado de Gómez *et al.* (2011)- FEDESARROLLO - datos de la FAO.

Es de resaltar el crecimiento de Brasil tanto en producción como en exportaciones, reflejando un crecimiento económico que al igual que otros países desarrollados se fundamenta en alta inversión en ciencia y tecnología, enfatizando en educación de alta calidad lo cual asegura la cualificación de mano de obra necesaria para el sustento de su desarrollo. De acuerdo al BID (2010), Brasil es el país que más invierte en Ciencia, Tecnología e Innovación en América Latina; situación diferente se vive en Colombia, donde Ciencia, Tecnología e Innovación han ocupado por varios años el último lugar de la inversión pública destinada a la agricultura (Gómez *et al.*, 2011). Por su parte en Brasil, gracias a la fuerte inversión en este campo, hoy en día sus empresas biotecnológicas cuentan con profesionales altamente calificados (40% con doctorado y 20% con maestría) (Pessoa, 2014).

La producción de biofertilizantes hace parte de la inversión biotecnológica brasilera, siendo los biofertilizantes nitrogenados para cultivo de soya de gran importancia por el significativo beneficio económico; el ahorro en fertilizantes nitrogenados de síntesis química es del orden de 10.3 billones de dólares anuales (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria-EMBRAPA, 2014). La proyección de EMBRAPA es intensificar la investigación científica para lograr en el año 2020 ofertar inoculantes y prácticas de manejo que favorezcan la FBN y reducir parcial o totalmente los niveles de fertilizantes de síntesis química aplicados en cultivos de leguminosas, gramíneas y otras especies de interés.

Este proceso biológico que contribuirá a una agricultura inserta en contexto de economía verde, con elevados niveles de productividad, bajos costos y bajos impactos ambientales, es un ejemplo a seguir y podría visualizarse como una posibilidad para el crecimiento del agro colombiano contextualizado en los cultivos agrícolas de interés para la economía nacional (Tabla 2).

Tabla 2. Cultivos de importancia en la agricultura colombiana y bacterias diazotróficas asociadas

| Cultivos ¹ | Géneros o especies de bacterias diazotróficas ² |
|-----------------------|--|
| Arroz | <i>Azospirillum brasiliense</i> , <i>Azospirillum amazonense</i> , <i>A. irakense</i> , <i>A. oryzae</i> , <i>A. zea</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Bacillus. cereus</i> <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Burkholderia vietnamiensis</i> , <i>Burkholderia. kururiensis</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>Herbaspirillum seropedicae</i> , <i>Klebsiella. oxytoca</i> |
| Banano | <i>Burkholderia tropica</i> , <i>B. brasiliensis</i> , <i>H seropedicae</i> |
| Cebada | <i>A. brasiliense</i> |
| Café | <i>A. amazonense</i> , <i>Enterobacter spp.</i> , <i>johannae</i> , <i>Gluconobacter azotocaptans</i> |
| Caña Azúcar | <i>Azospirillum lipoferum</i> , <i>A. amazonense</i> , <i>Beijerinckia fluminensis</i> , <i>Beijerinckia spp.</i> , <i>Beijerinckia. kururiensis</i> , <i>B. tropica</i> , <i>B. silvatlantica</i> , <i>Gluconacetobacter</i> , <i>H. seropedicae</i> , |
| Coco | <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Enterobacter spp.</i> <i>Sphingomonas paucimobilis</i> , <i>Pseudomonas spp</i> |
| Fríjol | <i>Rhizobium</i> |
| Maíz | <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>A. brasiliense</i> , <i>A. amazonense</i> , <i>A. canadense</i> , <i>Paenibacillus brasilensis</i> , <i>B. fluminensis</i> , <i>B. tropica</i> , <i>B. silvatlantica</i> , <i>H. seropedicae</i> |
| Sorgo | <i>A. amazonense</i> , <i>H. seropedicae</i> |
| Soya | <i>Bradyrhizobium japonicum</i> |
| Trigo | <i>A. brasiliense</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>Enterobacter spp.</i> |
| Yuca | <i>B. kururiensis</i> |

¹ Fuente: Sociedad de Agricultores de Colombia-SAC (2013)

² Adaptado de Moreira *et al.* (2010)

Conclusiones

La biofertilización nitrogenada es una práctica agrícola eficaz y eficiente comprobada en países de alta producción agrícola y de clima tropical, por tanto Colombia podría adoptar esta práctica como una herramienta de agricultura sustentable.

Aumentar la inversión en ciencia y tecnología enfocada a la producción de biofertilizantes

nitrogenados abre la posibilidad de disminuir costos en la producción agrícola colombiana, debido a la búsqueda de tecnologías que logren, a partir de consorcios microbianos, una producción agrícola sustentable, con la posibilidad de reducir el uso de la fertilización química nitrogenada.

Literatura citada

- Amer G.A. & Utkheda, R.S. (2000). Development of formulation of biological agents for management of root rot of lettuce and cucumber. *Can. J. Microbiol.* 46: 809–816.
- Abrol, Y.P., Pandey, R., Raghuram, N. & Ahmad, A. (2012). Nitrogen cycle sustainability and sustainable technologies for nitrogen fertilizer and energy management. *J. Ind. Instt. Sci.* 92 (1): 17-36.
- Baldani, V.L.D., Alvarez, M.A., Baldani, J.I. & Döbereiner, J. (1986). Establishment of inoculated *Azospirillum* spp. in the rhizosphere and in roots of field grown wheat and sorghum. *Pl Soil* (90): 35-46.
- Baldani, J.I., Pot, B., Kirchhof, G., Falsen, E., Baldani, V.L.D., Olivares, F.L., Hoste, B., Kersters, K., Harfmann, A., Gillis, M. & Döbereiner, J. (1996). Emended description of *Herbaspirillum*; inclusion of (*Pseudomonas*) *rubrisubalbicans*, a mild plant pathogen, as *Herbaspirillum rubrisubalbicans* comb. nov.; and classification of a group of clinical isolates (EF group 1) as *Herbaspirillum* species 3. *International Journal of Systematic Bacteriology* (46): 802-10.
- BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO BID (2010): La necesidad de innovar. El camino hacia el progreso de América Latina y el Caribe, BID, Washington D.C.
- Bashan, Y., Hernandez, J., Leyva, L.A. & Bacilio, M. (2002). Alginate microbeads as inoculant carriers for plant growth-promoting bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, 35(5), 359–368.
- Bhattacharjee, R. & Dey, U. (2014). Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, 8(24): 2332-2343.
- Casselari, A. (2014). Fixação biológica de nitrogênio em cana-de-açúcar inoculada com bactérias diazotróficas. Doctorado en Suelos y nutrición de plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiros", Piracicaba, SP, Brasil.
- Cavalcante, V.A. & Döbereiner, J. (1988). A new acid-tolerant nitrogen-fixing bacterium associated with sugarcane. *Plant and Soil* (108): 23-31.
- Chen Y.P., Rekha P.D., Arunshen A.B., Lai W.A. & Young, C.C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tri-calcium phosphate solubilizing abilities. *Appl. Soil Ecol.* (34): 33-41.
- Chingkhuihumba, Singh, Arvind, Rai & Amar. (2012). Characterization of free-living cyanobacterial strains and their competence to colonize rice roots. *Biology & Fertility of Soils*. 48 (6): 679. DOI: 10.1007/s00374-012-0664-7.
- DANE (2012). Boletín mensual insumos y factores asociados a la producción agropecuaria, Importancia de los fertilizantes nitrogenados, Septiembre. Núm. 3.
- Döbereiner J. (1992) History and new perspectives of diazotrophs in association with non-leguminous plants. *Symbiosis* 13, 1–13.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA. (2014, Febrero 3). Noticias- recursos naturais. Bactérias aumentam produtividade do milho e reduzem adubos químicos. Recuperado de: www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2467608/bacterias-aumentam-produtividade-do-milho-e-reduzem-adubos-quimicos
- Fancelli, L. (2010). Boas Práticas para uso eficiente de fertilizantes na cultura de milho. Informações Agrorquímicas. *International Plant Institute*. (131), 1-16.
- Galloway, J., Townsend, A., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R., Martinelli, L.A., Seitzinger, S.P. & Sutton, S. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science*, Washington, v. 320, p. 889-892.
- Gómez, J.H., Restrepo, J.C., Nash J., Valdes, A., Reina, M., Zuluaga, S., Bermudéz, W., Oviedo, S. & Perfetti, J.J. (2011). La política comercial del Sector Agrícola en Colombia. Cuaderno 38. FEDESARROLLO, 133 p.
- International Fertilizer Industry Association-IFA. (2007). Sustainable Management of the Nitrogen Cycle in Agriculture and Mitigation of Reactive Nitrogen Side Effects First edition
- Moreira, F.M.; DA Silva, K.; Nóbrega, R.S.; & Carvalho, F. (2010). Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. *Comunicata Scientiae, Piuai*, 1 (2), p. 74-99.
- Olivares J, Bedmar E. J. & Sanjuán, J. (2013). Biological Nitrogen Fixation in the Context of Global Change. *Molecular Plant Microbiology* 26 (5): 486–494.
- Oliveira A., Urquiaga S., Döbereiner J, & Baldani J. (2002). The effect of inoculating endophytic N₂-fixing bacteria on micropropagated sugarcane plants. *Pl Soil* (242): 205-215.
- Oliveira Jr., A., Castro, C., Klepker, D. & Oliveira, F.A. (2010). In: L.I. Prochnow, V. Casarin, S.R. Stipp (eds.). Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas. IPNI – Brasil (v.3): 1-18.
- Perin, L., Baldani, J.I. & Reis, V.M. (2004). Diversity of *Gluconacetobacter diazotrophicus* isolated from sugarcane plants cultivated in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (39): 763–770.
- Pessoa Junior, A. (2014). A Biotecnologia no Brasil. Memórias XII Congresso Latinoamericano de Microbiologia-ALAM 2014, 4 Congreso Colombiano de Microbiologia-4CCM 2014, Clínica- Bioanálisis-Industrial-Ambiental. *Hechos microbiológicos*. 1(2), p.20. Recuperado de: www.udea.edu.co/.../Vol-5_No2_Supl-2_2014_CONGRESO_ALAM.pdf
- Reis, Jr, F.B. dos, Reis, V.M., Urquiaga, S. & Döbereiner, J. (2000). Influence of nitrogen fertilisation on the population of diazotrophic bacteria *Herbaspirillum* spp. and *Acetobacter diazotrophicus* in sugar cane (*Saccharum* spp.). *Plant and Soil* (219): 153–159.

26. Raghuwanshi. R. (2012), Opportunities and challenges to sustainable agriculture in India, *NEBIO*, 3 (2): 78-86.
27. Reis, V.M., Baldani, J.I., Baldani, V.L.D. & Do"bereiner, J. (2000). Biological dinitrogen fixation in Gramineae and palm trees. *Critical Reviews in Plant Sciences* (19): 227–247.
28. Silva, M.F., Oliveira, P.J., Xavier, G.R., Rumjanek, N.G. & Reis, V.M. (2009). Inoculantes formulados com polímeros e bactérias endofíticas para a cultura da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(11): 1437–1443.
29. Sociedad de Agricultores de Colombia-SAC. (2013). Estudios Económicos, estadísticas. Producción de las principales actividades agrícolas y pecuarias. Producción agrícola. Recuperado de: <http://www.sac.org.co/es/estudios-economicos/estadisticas.html>
30. Upasana, M. & Sunil, P. (2004) Cyanobacteria: a potential biofertilizer for rice. *Resonance*, 9(6): 6–10.
31. Urquiaga, S., Cruz, K.H. & Boddey, R.M.. (1992). Contribution of nitrogen fixation to sugarcane: nitrogen-15 and nitrogen balance estimates. *Soil Science Society of America Journal* (56): 105–114.
32. Vitousek, P.M.; Aber, J.D., Howarth, R.W. Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlesinger, W.H. & Tilman, D.G. (1997) Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Application, Boulder*, (v. 7): p. 737–750
33. Vlek P.L.G. & Vielhauer K. (1994). Nutrient management strategies in stressed environments. In: *Stressed ecosystems and sustainable agriculture*. Virmani SM, Katyal JC, Eswaran H, Abrol IP (Eds.). Oxford and IBH-Publishing Co., New Delhi, India.