

# BIOFERTILIZACIÓN DE MAÍZ:

## PRÁCTICA REDITUABLE, FACTIBLE Y NECESARIA PARA LA AGRICULTURA DE NUESTRO PAÍS \*

La agricultura tecnificada se ha caracterizado por el uso intensivo de fertilizantes químicos y plaguicidas para mantener altas productividades en los cultivos, sin considerar los daños ocasionados a los ecosistemas, deterioro que se evidencia principalmente en la pérdida de productividad de los suelos, alteración de la calidad de los productos agrícolas, contaminación del ambiente y problemas de salud en la población (Higa y Parr, 1994).

En México se siembran cerca de 6 millones de hectáreas con maíz en áreas de temporal (Turrent, 2009) en las cuales el uso de fertilizantes químicos resulta una práctica riesgosa y de alto costo; la gran volatilidad de los precios del petróleo, del cual se derivan los fertilizantes químicos, provoca que esta práctica pueda llegar a representar hasta el 60 por ciento de los costos de producción (Cuadro 1).

Ante esta situación se buscan alternativas tecnológicas que permitan reducir los costos asociados a la fertilización química y de este modo hacer más redituable la producción agrícola no solamente en áreas de temporal sino también en áreas de agricultura tecnificada, como la que se desarrolla en los invernaderos, modalidad de producción que día a día gana más espacio en nuestro país.

Dentro de estas opciones resultan atractivas la optimización de las dosis de fertilización química, la aplicación de abonos orgánicos y el empleo de microorganismos capaces de mantener o incrementar los niveles de producción de los cultivos (microorganismos

**CUADRO 1. COSTOS DE PRODUCCIÓN DE MAÍZ DE TEMPORAL POR HECTÁREA EN EL ESTADO DE GUANAJUATO DURANTE EL AÑO 2009.**

Actividades	Costo	%
Rastreo	\$800.00	20.37
Cuadreo	\$400.00	10.18
Siembra	\$400.00	10.18
Control plagas y enfermedades (insecticida)	\$133.00	3.39
Fertilización	\$1,321.00	33.63
Herbicidas	\$874.00	22.25
Total	\$3,928.00	100.00

Nota: Las prácticas de rastreo, cuadreo y siembra comúnmente son realizadas por los propios productores. En estos casos el costo asociado a la fertilización química se puede incrementar hasta en un 60 por ciento.

promotores del crecimiento vegetal) optimizando la asimilación de los nutrientes presentes del suelo y reduciendo, en consecuencia, la cantidad de fertilizante químico aplicado.

La optimización de las dosis de aplicación de fertilización química considera el estatus actual de nutrientes del suelo y la estimación de la utilización real de nutrimentos por las plantas en función del aporte proporcionado por las distintas fuentes de N, P y K. Por ejemplo, para el caso de cereales se estima que del total de sulfato de amonio aplicado a las plantas se aprovecha del 14-47 por ciento, mientras que para el caso de nitrato de amonio del 17-34 por ciento y para la urea del 10 al 37 por ciento (Vázquez-Navarro y Peña-Cabriales, 1987).

La alternativa biológica se basa en el hecho de que algunos microorganismos habitantes del suelo que poseen la capacidad de promover el crecimiento de las plantas y por lo tanto son manipulados en laboratorio para la obtención de productos biológicos conocidos como biofertilizantes, los cuales pueden ser clasificados en función de los organismos empleados para su formulación en fúngicos (hongos), bacterianos (bacterias) y bacterofúngicos o compuestos (bacterias y hongos). En los primeros encontramos a hongos tales como *Trichoderma*, *Penicillium* y *Aspergillus*, pero de manera central a los hongos micorrizógenos, mejor

**CLARIDADES**  
GROPECUARIAS

Dr. Gerardo Armando Aguado-Santacruz

Es investigador adscrito al Campo Experimental Bajío del INIFAP en la Ciudad de Celaya, Gto. Es Investigador Nacional Nivel II del SNI y Jefe del Laboratorio de Biotecnología Microbiana y Fisiología Molecular de Plantas del INIFAP. Ha publicado diversos artículos en revistas científicas internacionales y nacionales. En conjunto con la M.C. Blanca Moreno Gómez, recibió por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato el Premio de Innovación Tecnológica 2008 por el desarrollo de biofertilizantes que ayudan a reducir las dosis de fertilización química en maíz y aumentan la productividad de diversos cultivos en al menos un 20-30 por ciento.

conocidos en el ámbito de la producción agrícola como micorrizas.

Por otro lado, dentro de los bacterianos encontramos a las bacterias *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Gluconacetobacter*, *Azotobacter* y *Azospirillum*, entre otros, y también algunas cianobacterias fijadoras de nitrógeno como *Nostoc* y *Anabaena*.

Diversos estudios demuestran la factibilidad de mejorar el comportamiento agronómico del maíz mediante el uso de biofertilizantes (Fallik y Okon 1996a; Fulchieri y Frioni, 1994; Purcino *et al.*, 1996) desde la reducción del tiempo de germinación y aumento de los porcentajes de germinación y establecimiento de las plántulas hasta incrementos sustanciales en los rendimientos finales del cultivo. Se menciona que del 13 al 20 por ciento del contenido de nitrógeno en maíz puede ser atribuido a la actividad fijadora de nitrógeno de bacterias tales como *Azotobacter* (Soliman y Abdel Monem, 1994).

Aunque en otros países como Rusia, Brasil, India, Uruguay y Cuba el uso de biofertilizantes para incrementar la productividad de los cultivos y reducir la cantidad de fertilizantes químicos es una práctica común, en México esta tecnología se encuentra aún en fase de adopción. En este contexto, el INIFAP ha sido pionero en la evaluación extensiva de estos productos biológicos y en los procesos de transferencia de esta tecnología a los productores de México. Su programa de validación nacional de biofertilizantes realizado en el año de 1999, y que se basó principalmente en el empleo de micorrizas y la bacteria *Azospirillum*, creó un ambiente de confianza entre los productores cooperantes que ahora utilizan esta tecnología como parte integral de sus sistemas de producción. Posteriormente, en el año de 2004 el INIFAP implementó su programa de investigación sobre biofertilizantes bacterianos a través del cual se han logrado identificar diversos microorganismos con gran potencial para la formulación de biofertilizantes.

Debido a la gran diversidad de ambientes que caracterizan a nuestro país, más recientemente el INIFAP se ha enfocado en la búsqueda y desarrollo de biofertilizantes ambiente-específicos, mejor adaptados a las condiciones ambientales locales y que, por lo tanto, se espera tengan una capacidad competitiva superior y un mayor impacto en la productividad de los cultivos.

Uno de los productos desarrollados por el Grupo de Biofertilizantes del INIFAP es el biofertilizante bacteriano INI2709 que es formulado con base en un consorcio de diferentes cepas de la especie *Pseudomonas fluorescens*. (Fig. 1) Este producto biológico ha demostrado su efectividad en diversos cultivos agrícolas de importancia económica en la región del Bajío.

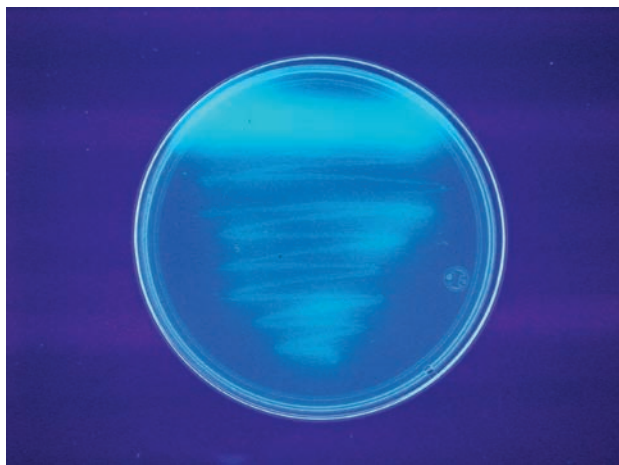


Figura 1. Emisión de fluorescencia bajo luz ultravioleta por una de las cepas de *Pseudomonas fluorescens* empleadas en la formulación del biofertilizante bacteriano INI2709.

Como ejemplo ilustrativo del potencial de los biofertilizantes en la agricultura en el artículo presentado en esta revista se muestran los resultados obtenidos en maíz de temporal inoculado con el biofertilizante INI2709.

Esta investigación se realizó en el año de 2005 en una parcela de una hectárea de superficie ubicada en la localidad "El Acebuche", Municipio de Tarimoro, Guanajuato. El terreno fue dividido en dos subparcelas de media hectárea cada una. Una de estas subparcelas fue fertilizada con el 100 por ciento, y la otra con el 50 por ciento, de la fertilización química empleada comúnmente por los productores de maíz de temporal de la zona (30-30-00), utilizando urea y superfosfato triple para el aporte de nitrógeno y fósforo, respectivamente. Asimismo, 1/4 de hectárea adicional se empleó para el establecimiento de las plantas de maíz del control absoluto en el cual se omitió la fertilización química y el uso del biofertilizante INI2709. La variedad de maíz utilizada para el estudio fue la V-322, desarrollado por el Programa de Mejoramiento Genético de Maíz del INIFAP. Parte de esta semilla fue inoculada con el biofertilizante INI2709 y sembrada en las distintas subparcelas. La combinación de estos factores dió origen a cinco tratamientos:

- T1. 100 por ciento Fertilización química (30-30-00) + Biofertilizante INI2709
- T2. 50 por ciento Fertilización química (15-15-00) + Biofertilizante INI2709
- T3. Biofertilizante INI2709
- T4. 100 por ciento Fertilización química (30-30-00)
- T5. Control absoluto (sin fertilización química, sin biofertilización).

Con 558.2 mm de lluvia ocurridos durante el año, y 497.8 durante el periodo de crecimiento de maíz (julio a septiembre), se considera que el temporal fue bueno y que, en términos generales, las condiciones climáticas que se presentaron durante el estudio fueron adecuadas para la producción de maíz en la zona (Fig. 2).

Las diferencias entre los tratamientos fueron muy claras desde el inicio del experimento y se reflejaron en los rendimientos finales obtenidos (Figs. 3 y 4). Aunque las plantas biofertilizadas y que recibieron la dosis de fertilización química completa mostraron consistentemente a través de todo el estudio una mayor altura, el mayor rendimiento de grano se observó en las plantas que recibieron la dosis completa de fertilización y en aquellas que solo recibieron la mitad de esta dosis pero que además se fueron biofertilizadas (Fig. 4), no encontrándose diferencias estadísticas entre estos dos últimos grupos de plantas.

Por otro lado, las plantas control que no fueron tratadas con el biofertilizante y que tampoco recibieron dosis alguna de fertilizante químico no lograron desarrollarse, por lo que no se cosechó grano al final del ciclo de cultivo. Contrariamente, aquellas plantas que recibieron al menos el biofertilizante lograron producir poco más de dos toneladas por hectárea.

Resulta interesante observar que la combinación de la fertilización química completa e inoculación con el biofertilizante no haya resultado en una mayor producción de grano.

Estudios realizados en plantas de maíz biofertilizadas con *Azospirillum brasilense* (Woodward y Bly, 2000) y *Pseudomonas fluorescens* (Shaharoon et al., 2006) muestran que los mayores incrementos en este cultivo por efecto de la inoculación se observaron en parcelas con dosis de fertilización nitrogenada subóptimas.

En este respecto está bien documentada la importancia de utilizar cantidades subóptimas de fertilizantes químicos cuando se emplean biofertilizantes ya que algunas bacterias pueden funcionar como desnitrificadoras en presencia de elevadas concentraciones de nitrógeno en el suelo (Bremner, 1997; Mulvaney et al., 1997). Alternativamente se supone que el amonio proveniente del fertilizante químico (urea) es oxidado rápidamente en el suelo a nitratos lo que provoca un

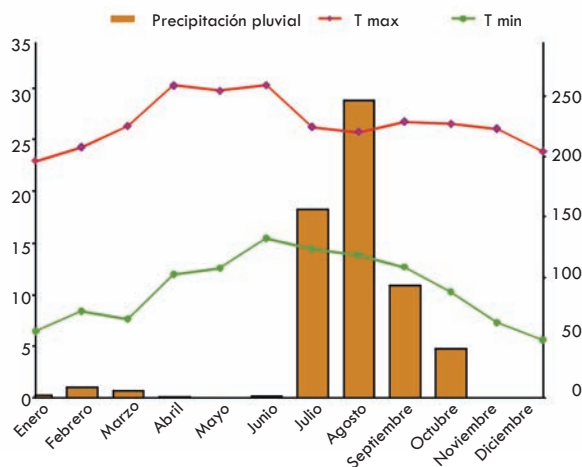


Figura 2. Diagrama ombrotérmico de las condiciones climáticas prevalecientes durante el estudio (2005).



Figura 3. Aspecto de la parcela de maíz a la cual se le aplicó el 50 por ciento de la fertilización química utilizada por los productores de temporal de la zona (30-30-00). Hacia la izquierda de la imagen las plantas de maíz fueron además inoculadas con el biofertilizante bacteriano INI2709.

aumento en la síntesis de etileno (a través de la activación de la enzima ACC-oxidasa) y una reducción en la efectividad de la inoculación con bacterias que contienen ACC-desaminasa como *Pseudomonas fluorescens* (Shaharoon et al., 2006).

Los resultados presentados en este artículo muestran los beneficios del biofertilizante desarrollado por el INIFAP con base en una formulación de diferentes cepas de *Pseudomonas fluorescens*. En México es abundante la información sobre el efecto de microorganismos promotores de crecimiento como *Azospirillum* y micorrizas sobre la productividad de diversos cultivos, y de manera particular de maíz.

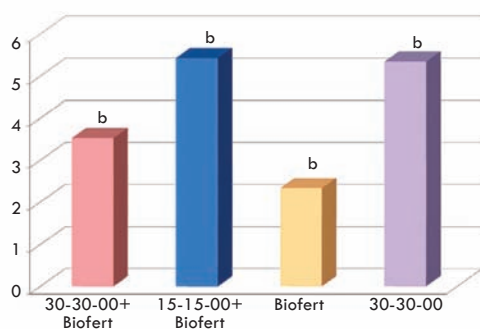


Figura 4. Rendimientos de grano obtenidos en maíz de temporal inoculado con un biofertilizante formulado con base en un consorcio de la bacteria *Pseudomonas fluorescens*.

Reduciendo la dosis de fertilización química nitrogenada a la mitad (66 unidades proporcionadas en forma de urea) y empleando dos biofertilizantes basados en *Azospirillum*, Abdel Monem et al. (2001) lograron incrementar la producción de maíz en dos toneladas/ha por encima de los rendimientos obtenidos en parcelas a las cuales se les suministró el 100 por ciento de la fertilización de nitrógeno (132 unidades) bajo condiciones de riego adecuado. Contrariamente, cuando la cantidad de agua se redujo en un 25 por ciento, las plantas biofertilizadas y que sólo recibieron la mitad del fertilizante nitrogenado produjeron de 0.4 y 1.5 ton/ha menos grano que las plantas no biofertilizadas y que recibieron el 100 por ciento del aporte de nitrógeno. Resultados similares fueron reportados por Fallik y Okon (1996a y 1996b). Por su parte, Uribe et al. (2007) no encontraron diferencias en rendimiento entre plantas inoculadas con los microorganismos *Azospirillum brasilense* y la micorriza Glo-

mus intraradices y plantas fertilizadas químicamente (40-100-00).

A diferencia de *Azospirillum*, los efectos del empleo de *Pseudomonas fluorescens* como biofertilizante en México, y particularmente en maíz, están menos documentados, si bien estudios realizados en otros países muestran los beneficios del empleo de esta bacteria.

Santillana (2006) encontró que plantas de maíz inoculadas con tres dosis de *Pseudomonas* sp. mostraron un mayor desarrollo de vástago y raíz que plantas control no inoculadas. Además, las plantas biofertilizadas no mostraron diferencias en estas variables con respecto a plantas fertilizadas químicamente (80-80-00). Vikram et al. (2007) muestra incrementos en el desarrollo de raíz y vástago de plantas de maíz por efecto de la inoculación con *Pseudomonas fluorescens*. Este efecto benéfico se potenció cuando las plantas de maíz se co-inoculaban con dos cepas distintas de *Bradyrhizobium*, una bacteria con actividad fijadora de nitrógeno. Nezarat and Gholami (2009) encontraron, por su parte, incrementos de hasta un 18.5 por ciento en la germinación de maíz inoculado con diversas cepas de *Pseudomonas* y *Azospirillum*. El vigor de las plántulas (medido en términos del crecimiento de raíz y vástago, así como los porcentajes de germinación) y diversas variables de productividad, tales como peso seco de semilla (g•m<sup>2</sup>), peso de 100 semillas y el número de semillas por mazorca también fueron mayores en las plántulas inoculadas con estos microorganismos. Por último, Nadeem et al. (2009) refieren los beneficios que el empleo de esta bacteria puede tener en suelos con elevadas concentraciones de sal, problema que día a día cobra más importancia en nuestro país por el abatimiento de los mantos acuíferos.

Las formas en que *Pseudomonas fluorescens* promueve el crecimiento de las plantas son muy diversas y varían desde el control de hongos (Ganeshan and Kumar, 2005) y nemátodos (Hass and Keel, 2003) dañinos a las plantas, la producción de compuestos llamados sideróforos que liberan el hierro de formas complejas y lo hacen asimilable a las plantas (Hamdan et al., 1991), solubilización de fosfatos (Trujillo et al., 2007), incremento del desarrollo de las raíces mediante la reducción de los niveles de etileno en el suelo (Nadeem et al., 2009), fijación de nitrógeno (Gowda y Watanabe, 1985; Chan, 1994) y la producción de hormonas como citocininas (Neito y Frankenberger,

1989) y auxinas (Dey *et al.*, 2004), hasta la inducción de resistencia sistémica, un mecanismo a través del cual las plantas desarrollan resistencia a ciertos patógenos mediante su contacto previo con bacterias no patogénicas, de modo análogo a lo que sucede con las vacunas en animales.

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

De los resultados presentados anteriormente resultan evidentes los beneficios del empleo del biofertilizante INI2709 formulado con base en un consorcio de cepas de la especie *Pseudomonas fluorescens*. Este producto biológico fue evaluado en diferentes ambientes agroecológicos de México con resultados similares a los presentados aquí, por lo que el INIFAP recibió por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato el Premio a la Innovación Tecnológica 2008. Si consideramos que en nuestro país se siembran aproximadamente 6 millones de ha, que en estas áreas se llegan a utilizar 210 kg de fertilizante nitrogenado y 60 kg de fertilizante fosfatado por ha y que el biofertilizante INI2709 puede lograr reducir en un 30 por ciento la cantidad de fertilizante químico aplicado, entonces sería factible que nuestro país ahorrara cerca de \$ 1,900 millones de pesos (asumiendo un costo aproximado de \$3,880.00 por tonelada de urea y \$3,500.00 por tonelada de fosfato diamónico) y la necesidad de importar 810,000 toneladas de fertilizante químico.

En este punto es importante mencionar que los biofertilizantes no reemplazan a los fertilizantes químicos sino que ayudan a que éstos sean aprovechados de una manera más eficiente por las plantas, por lo que en función del estatus nutricional actual del suelo se recomienda reducir solamente de un 30 a un 50 por ciento las dosis de fertilización química. La sola utilización de biofertilizantes sin el retorno de nutrientes al suelo a través de los fertilizantes químicos o abonos orgánicos podría implicar la pérdida gradual de la fertilidad del suelo.

Aunque en México los biofertilizantes formulados con base en *Azospirillum*, *Bacillus*, *Trichoderma*, *Rhizobium* y micorrizas son los más conocidos en México y actualmente existen en el mercado diferentes marcas comerciales, la evaluación de otros microorganismos con reconocidas capacidades de promoción de crecimiento como *Azotobacter*, *Enterobacter*, las cianobacterias (*Nostoc*, *Anabaena*, *Tolypothrix* y *Aulosira*,

así como la bacteria *Gluconacetobacter*, más recientemente descubierta, será instrumental para consolidar esta tecnología en México y contar con microorganismos alternativos para la gran diversidad de ambientes agroecológicos que caracterizan a nuestro país. Si bien sabemos que México está siendo uno de los últimos países latinoamericanos en adoptar esta tecnología, los científicos mexicanos tendremos, en el futuro cercano, que estrechar la brecha que nos separa de otros países más avanzados en cuanto al uso y desarrollo de biofertilizantes. Dentro de este contexto también será importante definir los mecanismos que nos permitan regular la calidad de los biofertilizantes, ya que a la luz del potencial económico de estos productos la aparición de productos de escasa calidad con efectos poco predecibles en los rendimientos de los cultivos podría poner en riesgo la consolidación de esta tecnología en nuestro país.



## BIBLIOGRAFÍA

- Abdel Monem, M.A.S., Khalifa, H.E., Beider, M., El Ghandour, I.A. and Galal, Y.G.M. 2001. Using biofertilizers for maize production: response and economic return under different irrigation treatments. *J. Sustain. Agric.* 19:41-48.
- Bremner, J.M. 1997. Sources of nitrous oxide in soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 49:7-16.
- Chan, Y.K., Barraquio, W.L. and Knowles, R. 1994. N<sub>2</sub> fixing pseudomonads and related soil bacteria. *FEMS Microbiol. Rev.* 13:95-118.
- Dey, R., Pal, K.K., Bhatt, D.M. and Chauhan, S.M. 2004. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiol. Res.* 159:371-394.
- Fallik, E. and Okon, Y. 1996a. The response of maize (*Zea mays*) to *Azospirillum* inoculation in various types of soils in the field. *World J. Microbiol. Biotech.* 12:511-515.
- Fallik, E. and Okon, Y. 1996b. Inoculants of *Azospirillum brasilense*: Biomass production, survival and growth promotion of *Setaria italica* and *Zea mays*. *Soil Biol. Biochem.* 28:123-126.
- Fulchieri, M. and L. Frioni. 1994. *Azospirillum* inoculation on maize (*Zea mays*) effect on yield in a field experiment in central Argentina. *Soil Biol.* 26:921-923.
- Ganeshan, G. and Kumar, A.M. 2005. *Pseudomonas fluorescens*, a potential bacterial antagonist to control plant diseases. *J. Plant Interact.* 1: 123-134.
- Gowda, T.K.S. and Watanabe I. 1985. Hydrogen-supported N<sub>2</sub> fixation of *Pseudomonas* sp. and *Azospirillum lipoferum* under free-living conditions and in association with rice seedlings. *Can. J. Microbiol.* 31:317-321.
- Haas, D. and Keel, C. 2003. Regulation of antibiotic production in root-colonizing *Pseudomonas* spp. and relevance for biological control of plant disease. *Annu. Rev. Phytopathol.* 41:117-153
- Hamdan, H., Weller, D.M. and Thomashow, L.S. 1991. Relative importance of fluorescent siderophores and other factors in biological control of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* by *Pseudomonas fluorescens* 2-79 and M4-80R. *Appl. Environ. Microbiol.* 57:3270-3277.
- Higa, T. and Parr, J.F. 1994. Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment. International Nature Farming Research Center, Atami, Japan. 16 p.
- Mulvaney, R.L., Khan, S.A. and Mulvaney, C.S. 1997. Nitrogen fertilizers promote denitrification. *Biol. Fertil. Soils* 24:211-220.
- Nadeem, S.M., Zahir, Z.A., Naveed, M. and Arshad, M. 2009. Rhizobacteria containing ACC-deaminase confer salt tolerance in maize grown on salt-affected fields. *Can. J. Microbiol.* 55:1302-1309.
- Neito, K.F. and Frankenberger, W.T., Jr. 1989. Biosynthesis of cytokinins by *Azotobacter chroococcum*. *Soil Biol. Biochem.* 21:967-972.
- Nezarat, S. and Gholami, A. Screening plant growth promoting rhizobacteria for improving seed germination, seedling growth and yield of maize. *Pakistan J. Biol. Sci.* 12:26-32.
- Purcino, A.A.C., Paiva, E., Silva, M.R. and de Andrade, S.R.M. 1996. Influence of *Azospirillum* inoculation and nitrogen supply on grain yield, and carbon- and nitrogen assimilating enzymes in maize. *J. Plant Nutr.* 19:1045-1060.
- Santillana, V.N. 2006. Producción de biofertilizantes utilizando *Pseudomonas* sp. *Ecología Aplicada* 5:87-91.
- Shaharoon, B. Arshad, M., Zahir, Z.A. and Khalid, A. 2006. Performance of *Pseudomonas* spp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in the presence of nitrogenous fertilizer. *Soil Biol. Biochem.* 38:2971-2975.
- Soliman, S. and Abdel Monem, M. 1994. Influence of <sup>15</sup>N labeled urea and *Azotobacter* on corn yield and nitrogen budget as affected by organic matter. Proceeding of the 2<sup>nd</sup> Arab Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. 5-9 November, Cairo, pp. 683-694.
- Trujillo, M., Velázquez, E. Miguélez, S., Jiménez, M., Mateos, P. and Martínez-Molina, E. 2007. Characterization of a strain of *Pseudomonas fluorescens* that solubilizes phosphates in vitro and produces high antibiotic activity against several microorganisms. First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization. *Develop. Plant Soil Sci.* 102: 265-268.
- Turrent, F.A. 2009. El potencial productivo del maíz. *Ciencias* 92-93:126-129.
- Uribe, V.G., Petit, J. y Dzib E.R. 2007. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación de biofertilizantes en el sistema roza, tumba y quema en suelo alfisol (chac-lu'um, nomenclatura maya), en Yucatán, México. *Agricultura Andina* 13:3-18.
- Vázquez-Navarro, G. and Peña-Cabrales, J.J. 1987. Efficiency of different nitrogen sources for *Sorghum bicolor* grown in a vertisol. Report FAO-IAEA. Vienna.
- Vikram, A., Krishnaraj, P.U., Hamzehzarghani, H., Jagadeesh, K.S. 2007. Growth promotional potential of *Pseudomonas fluorescens* FPD-10 and its interaction with *Bradyrhizobium* sp. *Res. J. Microbiol.* 2:354-361.