

# Uso de microorganismos benéficos para reducir los daños causados por la revolución verde

Laura Abisaí Pazos-Rojas<sup>1,3</sup>, Vianey Marín-Cevada<sup>1</sup>, Yolanda Elizabeth Morales García<sup>1,2</sup>, Antonino Baez<sup>1,2</sup>, Miguel Angel Villalobos-López<sup>3</sup>, Martín Pérez-Santos<sup>1</sup> y Jesús Muñoz-Rojas<sup>1</sup>

Laboratorio de Ecología Molecular Microbiana, Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, Instituto de Ciencias<sup>1</sup>, Escuela de Biotecnología<sup>2</sup>, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada<sup>3</sup>  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla<sup>1,2</sup>, Instituto Politécnico Nacional<sup>3</sup>

Puebla, Pue.<sup>1,2</sup>, Tepetitla, Tlax.<sup>3</sup>; México

[yellowtweety194]@hotmail.com, [vianey.marin, antonino.baez, martin.perez]@correo.buap.mx, [mvillalobos]@ipn.mx, [lissiamor, joymerre]@yahoo.com.mx

**Abstract**— To satisfy the global food need, agricultural practices like use of improved crop varieties, high levels of nitrogen fertilizer, pesticides, and irrigation have been adopted. Such practices, the so-called “green revolution”, have helped boost agricultural productivity decreasing food prices, but it also have caused detrimental effects on the environment. The aim of this paper is highlight the harmful effects of the green revolution and discuss the potential benefit of using microbial inoculants to revert the damage caused by intensive agriculture. This work calls the attention of people involved in agricultural practices to change their production practices for those that conduct to a sustainable management of natural resources.

**Keyword**— *Pesticides, Herbicides, Eutrophication. Nitrogen fertilization, Phytoestimulation, Bioremediation.*

**Resumen**— Para satisfacer las necesidades alimenticias de la humanidad se utilizan prácticas agrícolas que implican el uso de variedades mejoradas, niveles elevados de fertilizantes nitrogenados, pesticidas, herbicidas y riego. Esta tecnología, llamada “revolución verde” permitió incrementar los rendimientos agrícolas y una disminución en los costos de alimentos; empero, ha traído efectos adversos al medioambiente. Los objetivos de este trabajo son: mostrar algunos de los efectos adversos generados por la revolución verde y analizar como los microorganismos benéficos aplicados como inoculantes en cultivos agrícolas podrían revertir los daños que se han generado por la agricultura intensiva. Este trabajo concientiza a la gente involucrada en la producción agrícola para cambiar su forma de producción por una agricultura compatible con el bienestar del planeta.

**Palabras claves**— *Pesticidas, Herbicidas, Eutrofización, Fertilizantes nitrogenados, Fitoestimulación, Bioremediación.*

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico ha provocado un aumento mundial en las necesidades de alimentación, así como una multitud de desacuerdos entre naciones, derivada de la mala distribución de los alimentos [1, 2, 3]. A principios de 1940, la alternativa denominada “revolución verde” propuso la producción masiva de cultivos agrícolas [4, 5], especialmente aplicada para monocultivos de cereales, tales como maíz y trigo. Bajo esta propuesta se implementaron algunos componentes que fueron claves para hacer permisible la idea: I) el uso de variedades mejoradas, II) la adición de cantidades elevadas de fertilizantes nitrogenados (por ejemplo urea, nitrato de amonio, cloruro de amonio, entre otros), III) la implementación de parcelas con riego y IV) el uso de pesticidas y herbicidas. Con ello, se lograron rendimientos de cultivos muy elevados de forma tal que los costos de los alimentos disminuyeron significativamente provocando una mayor disponibilidad de éstos [6, 7]. Sin embargo, la excesiva explotación de los terrenos de cultivo, ha generado daños al medioambiente y los miembros del entorno.

En esta revisión se plantearon como objetivos principales, mostrar algunos de los efectos adversos generados por la revolución verde y analizar como los microorganismos benéficos aplicados como inoculantes en cultivos agrícolas podrían revertir los daños que se han generado por la agricultura

intensiva. Este trabajo es importante porque la gente involucrada podrá ser concientizada de los efectos negativos que se están generando en el ambiente derivados de la revolución verde y se les muestra una alternativa efectiva para revertir los daños ambientales en los campos de cultivo.

## II. INCONVENIENTE DEL USO DE VARIEDADES MEJORADAS

Aunque en un principio la idea de mayor productividad agrícola era buena, las variedades vegetales fueron seleccionadas con base a la obtención de mayores rendimientos y dependencia a herbicidas [8, 9], sin considerar otras características agronómicas relevantes tales como la calidad de proteína en semillas, sabor, eficiencia del uso de nutrientes y características ecológicas como la capacidad de las plantas para interactuar con microorganismos. Por ejemplo, en el maíz se seleccionaron solo variedades blanco-amarillas de elevada productividad que no contenían todas las antocianinas representantes del maíz; empero estas antocianinas son antioxidantes esenciales que podrían ayudar a nuestro organismo para defenderse eficazmente de procesos de envejecimiento por oxidación [10]. El enfoque principal para el trigo fue mejorar su rendimiento mediante el aumento del índice de la cosecha, y esto se logró con la introducción de genes “semi-enanos” en cereales y otros cultivos, lo que resultó en variedades vegetales con baja producción de paja. En los cereales este enfoque dio lugar a (A) una reducción de tamaño y profundidad del sistema de raíces, (B) un aumento de la dependencia de altos insumos inorgánicos de nitrógeno para alcanzar contenidos de proteína satisfactorios, (C) una menor eficiencia del uso de nutrientes, (D) una disminución de la competitividad frente a las malas hierbas o disminución de la robustez contra el control mecánico de malezas (y con ello una mayor dependencia de los herbicidas), (E) una mayor susceptibilidad a enfermedades provocadas por hongos como *Septoria* y *Fusarium*, (F) una mejor resistencia al acame, y (G) un contenido reducido de proteínas [9].

Por otro lado, en diversas partes del mundo las variedades nativas de plantas fueron sustituidas por variedades con características de alta productividad, lo que provocó la desaparición de las primeras [11] y quizás con éstas se perdieron muchos metabolitos de interés que nunca fueron descubiertos. Este último punto es de gran relevancia para países que son sitios de origen de algunas plantas en particular. Por ejemplo, la zona central mexicana es lugar de origen del maíz [12, 13], por lo que resultaría devastador si en estas regiones los agricultores dejaran de sembrar sus variedades criollas al sustituirlas por variedades mejoradas o transgénicas; con ello, se perderían verdaderos tesoros genómicos que éstas variedades albergan [14].

## III. INCONVENIENTE DEL USO DESMEDIDO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

El uso de fertilizantes nitrogenados sin duda ha repercutido positivamente en el aumento de rendimiento de los cultivos [15]. Sin embargo, hay que considerar las desventajas que derivan del uso elevado de estos compuestos.

A) El análisis de la obtención de los fertilizantes nitrogenados muestra altos costos energéticos y desalentadores desde un punto de vista económico, lo que conlleva a planear estrategias alternativas para su producción. La forma para la obtención de amonio se realiza mediante el proceso de Haber-Bosch, en donde el nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) es combinado con hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ) a temperaturas superiores a 500 °C, condiciones de presión elevadas; y uso de catalizadores químicos [16]. La eficiencia de la reacción no es muy alta y la gran cantidad de energía requerida proviene del petróleo, lo que incrementa el costo del producto y contamina al medioambiente a gran escala. El amonio obtenido es estabilizado en forma de sales de amonio o mediante su transformación por oxidación a nitratos [17]; lo cual también requiere una elevada cantidad de energía. Recientemente, se ha propuesto una alternativa para producir amonio, mediante el uso de cianobacterias evitando así el consumo de energías

no-renovables [18]; sin embargo, la obtención de fertilizantes por esta vía aún no está disponible. La producción de fertilizantes nitrogenados por la vía Haber-Boch es muy costosa, debido al consumo de combustibles fósiles, pero el uso de éstos se ha sostenido en la agricultura a través de los años a tal grado que en algunos países, como México, se han subsidiado los costos de los fertilizantes con la finalidad de que los agricultores puedan adquirir el producto para su adición a los cultivos [19].

B) Un problema grave es que en ciclos de cultivo posteriores se han tenido que adicionar mayores cantidades de fertilizantes nitrogenados con la finalidad de sostener los rendimientos deseados; esto ha conllevado a un aumento en los costos de producción [20]. Desafortunadamente, entre el 30-40% de los fertilizantes adicionados a los cultivos son aprovechados por las plantas y el resto es perdido mediante lixiviación [20, 21, 22, 23]. Una elevada proporción de estos fertilizantes son lixiviados hasta los mantos freáticos, pudiendo llegar a ríos o lagunas donde ocurre el enriquecimiento de nutrientes en los mantos acuíferos (eutrofización); lo que permite el crecimiento de plantas y que para el caso de los compuestos nitrogenados forman una fina capa en la superficie de las lagunas que impiden el paso de oxígeno [24, 25]. La eutrofización provoca dos fenómenos que en nuestros días son muy comunes, una elevada población de lirios en las lagunas (que aprovechan los compuestos nitrogenados) y la muerte de los peces y otros organismos acuáticos debido a la baja disponibilidad de oxígeno en su ambiente [26]. Por otro lado, los productos nitrogenados presentes en lagunas y ríos pueden ser transformados por actividad bacteriana a óxidos de nitrógeno (NOx) (por ejemplo óxido nítrico y óxido nitroso). Estos óxidos son sumamente volátiles y por ende reaccionan con el agua presente en las nubes, retornando al suelo en forma de lluvia ácida, por la generación de ácido nítrico [21, 23, 24]. Adicionalmente, parte de los NOx llegan hasta la estratosfera pudiendo afectar a la capa de ozono [27, 28, 29]. Razón por la que los óxidos de nitrógeno podrían contribuir al debilitamiento de esta capa tan importante para la filtración de los rayos solares [30]. Es concebible pensar que los fertilizantes usados en agricultura han contribuido significativamente a los cambios globales que el planeta ha sufrido desde los años en que la revolución verde apareció con gran impacto [31, 32, 33].

C) Por otro lado, se ha observado que el fertilizante nitrogenado adicionado a los cultivos causa cambios fisiológicos en las plantas, los cuales afectan al establecimiento de microorganismos benéficos como ocurre para *Gluconacetobacter diazotrophicus* en la caña de azúcar [34], o bien podrían afectar el sabor de los frutos, como se ha reportado para el jitomate, donde las características del buen sabor son disminuidas con la adición de nitratos [35, 36].

#### IV. CULTIVOS CON RIEGO, VENTAJA O RIESGO

La implementación de riego en cultivos agrícolas, sin duda ha beneficiado en la obtención de una mayor productividad agrícola. Para abastecer las necesidades de agua de los cultivos se han tenido que cavar diversos pozos en las zonas agrícolas, no obstante, el agua de los mantos freáticos es finita y éstos se alimentan de las lluvias anuales. Esta cantidad de agua no es constante y en el presente depende del cambio climático [37, 38]. Además, la irrigación continua de los cultivos puede provocar una disminución acelerada de los mantos acuíferos [24]. El aumento demográfico y las necesidades de agua de las ciudades han incrementado la problemática de la disposición de agua dulce. Quizás en el centro de México esta problemática es imperceptible, sin embargo, en zonas del norte del país y en otros países como los europeos la escasez de agua ha llegado a un nivel alarmante que incluye el secado completo de los pozos [39, 40, 41]. Un ejemplo bastante lamentable lo constituye: Cuatro Ciénegas, Coahuila, México, una región desértica donde se ha tenido que entubar agua a partir de los recintos naturales para alimentar a los cultivos agrícolas [42], provocando la disminución de los mantos freáticos a grados extremos, y por consecuencia el potencial peligro de extinción de la biodiversidad resguardada en Cuatro Ciénegas [43, 44].

## V. MALESTARES DEL PLANETA DEBIDOS AL USO DE PESTICIDAS Y HERBICIDAS

En general, los pesticidas y herbicidas son moléculas orgánicas tóxicas, éstas pueden ser diferentes estructuralmente, por ejemplo, pueden ser de tipo aromático o bien moléculas cíclicas organocloradas, entre otras. Diversas son las moléculas de tipo herbicidas y pesticidas que han salido al mercado; desafortunadamente, muchas de estas son responsables de daños a los organismos y el medioambiente [45, 46, 47, 48]. Por ejemplo, se ha demostrado que el benomilo (un antifúngico empleado en agricultura) es una molécula tóxica para peces y seres humanos [49, 50]. El ácido 2,4-diclorofenoxiacético (utilizado como pesticida o herbicida), en concentraciones relativamente bajas, puede provocar malformaciones [51, 52]. Otras moléculas organocloradas como el lindano (hexaclorociclohexano), son tan tóxicas a nivel celular y son capaces de desencadenar cáncer [53, 54]. Este compuesto, utilizado como herbicida, ha sido prohibido en países europeos, pero que continúa utilizándose en la agricultura intensiva de otras regiones del mundo como México [55, 56]. El listado de compuestos tóxicos adicionados para una agricultura de alta productividad es grande, no todos los productores adicionan los mismos y muchos de estos productos podrían ser transformados a otros compuestos más tóxicos [55]. Algunos de estos compuestos podrían ser absorbidos por las plantas y acumularse dentro de ellas, incluyendo el interior de los frutos o semillas comestibles. Este fenómeno ha sido demostrado tanto en plantas de maíz que absorben TNT (trinitrotolueno) como en plantas de papa donde se adiciona una cantidad elevada de tóxicos orgánicos para conseguir la productividad deseada [57, 58, 59]. Actualmente, debido a la contaminación ambiental se han incrementado los casos de cáncer en la población humana, al igual que los casos de animales con modificaciones genéticas (mutaciones) [60, 61, 62, 63, 64]. Particularmente, muchos de los compuestos usados en la agricultura tienen un alto potencial cancerígeno y mutagénico [49], y por ello es concebible que estén contribuyendo al incremento de la incidencia de cáncer ¿Podemos hacer algo al respecto?

## VI. RUMBO A UNA AGRICULTURA SANA

A causa de los inconvenientes provocados por la “revolución verde” se han planteado estrategias de agricultura sana para evitar las adversidades mencionadas. Una alternativa propuesta es la agricultura orgánica, donde se trata de evitar el uso de agroquímicos contaminantes, tóxicos orgánicos e incluso a los fertilizantes nitrogenados. Este tipo de agricultura ya se había implementado en épocas pasadas y en la actualidad se está intentando retomar parte de esa experiencia. En lugar de fertilizar con compuestos químicos se usa composta o fertilizantes orgánicos y este tipo de agricultura debe estar libre de pesticidas [3, 65, 66]. En países europeos esta práctica ha sido bien aceptada e incluso en algunos supermercados la gente es libre de escoger un producto agrícola obtenido mediante agricultura intensiva que generalmente es más barato o bien elegir un producto obtenido mediante agricultura orgánica que es relativamente más costoso, incluso con una apariencia peor, pero que en teoría es más sano [36, 67]. En México una organización agrícola ejemplar está representada por la comunidad de “Vicente Guerrero” del estado de Tlaxcala, quienes además de optar por una agricultura orgánica han tomado la decisión de capacitarse directamente con científicos que estudian el ambiente y la agrobiotecnología con el fin de obtener una producción agrícola sana (<http://vicenteguerrero.blogspot.org/>).

## VII. USO DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS

Los microorganismos benéficos son aquellos que realizan alguna función que favorece el crecimiento, la nutrición o la salud de los hospederos con quienes interaccionan o bien proporcionan un beneficio directo al ambiente [68]. Aquellos que son capaces de promover el crecimiento de plantas han sido estudiados intensamente y se han aplicado a cultivos de interés agrícola tanto a nivel experimental

como comercial [69, 70]. Los mecanismos por los cuales los microorganismos estimulan el crecimiento de plantas son muy diversos y se clasifican en mecanismos directos e indirectos [70, 71, 72]. Los directos incluyen la fijación biológica de nitrógeno, la producción de fitohormonas, la producción de ACC-desaminasa y la solubilización de fosfatos (Tabla I). Entre los mecanismos indirectos podemos mencionar a la estimulación de defensa en las plantas mediante la vía de respuesta sistémica inducida y la producción de antimicrobianos que afectan al crecimiento de patógenos (Tabla 2). Recientemente, se ha incrementado el uso de microorganismos benéficos que potencian el crecimiento de plantas con el fin de obtener plantas sanas y mayores rendimientos sin el uso de agroquímicos. Entre los microorganismos benéficos que han sido aplicados al campo, algunos promueven el crecimiento de plantas y otros degradan compuestos tóxicos [70, 71]. Diversas investigaciones científicas han demostrado una evolución de las plantas asociadas a bacterias benéficas, con quienes establecen un diálogo molecular efectivo que permite que las bacterias otorguen beneficios a las plantas, y a su vez las plantas proporcionan fuente de carbono y un hábitat de protección para sus simbioses [73, 74]. Las bacterias benéficas aplicadas a cultivos agrícolas permiten la fitoestimulación y la bioremediación de compuestos tóxicos asociados a plantas; repercutiendo positivamente en la salud humana y el ambiente [75, 76, 77, 78, 79, 80]. Las bacterias que promueven el crecimiento de plantas incrementan el tamaño de sus raíces, lo que las hace más eficientes para absorber nutrientes del suelo. De esta forma, los agricultores que han explorado el uso de microorganismos benéficos han obtenido rendimientos elevados adicionando menos fertilizantes que el que normalmente se aplica a los cultivos. Por ejemplo, la aplicación de cepas de *Azospirillum* en gramíneas permite un ahorro hasta del 50% de fertilizantes, y la obtención de los mismos rendimientos comparado con el uso del 100% de fertilizantes [81]. Esta disminución en el uso de fertilizantes es de gran importancia si se desea abatir aquellos daños provocados por la eutrofización y la generación de NOx. Hay varias bacterias con potencial promotor de crecimiento que podrían ser usadas para incrementar los rendimientos de los cultivos y al mismo tiempo evitar el uso desmedido de fertilizantes químicos (Tabla I y II).

El uso de bacterias bioremediadoras que eliminan los compuestos tóxicos añadidos durante un largo periodo en cultivos agrícolas (pesticidas, herbicidas, fungicidas, entre otros) y la disminución de la aplicación de productos tóxicos, pueden disminuir en gran medida los niveles de contaminación agrícola y la incidencia de enfermedades asociadas a esos tóxicos [82, 83]. Así, los microorganismos pueden ser claves para iniciar la detoxificación de suelos contaminados por la agricultura intensiva, e indirectamente se aportaría al impacto en la salud humana. Algunos ejemplos de microorganismos con capacidad de degradar compuestos tóxicos son mostrados en la Tabla III.

La aplicación de microorganismos benéficos aún es muy limitada, siendo México y Argentina los países de América donde se producen y comercializan formulaciones bacterianas en mayor escala [70]. La población de “Vicente Guerrero”, y grupos ejidales de Tlaxco-Tlaxcala, Chapantongo-Hidalgo y zonas de Puebla han implementado el uso de un inoculante multiespecies diseñado en el Laboratorio de Ecología Molecular Microbiana de la BUAP-Puebla [72], con resultados exitosos para obtener una mayor productividad acoplado al uso de fertilizantes orgánicos y sin usar compuestos tóxicos.



Tabla I. Ejemplos de bacterias que promueven el crecimiento de plantas mediante mecanismos directos.

Ejemplos de bacterias implicadas	Referencia	Mecanismo bacteriano ejercido asociado a las plantas	Contribución
<i>Rhizobium etli</i> <i>Bradyrhizobium japonicum</i> <i>Azospirillum brasilense</i> <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> <i>Azotobacter</i> sp. NAT 13	[84] [85] [86] [87] [88]	Fijación Biológica de Nitrógeno. Las bacterias toman N <sub>2</sub> de la atmósfera y lo transforman en amonio, cuando el fenómeno se realiza asociado a las plantas, estas últimas se benefician de este nutrimento esencial.	Sustitución ó disminución de fertilizantes nitrogenados
<i>Azospirillum brasilense</i> <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> <i>Bacillus</i> sp. LMA5 <i>Enterobacter cloacae</i> <i>Herbaspirillum seropedicae</i>	[81] [89] [90] [91] [92]	Producción de fitohormonas. Las bacterias pueden producir fitohormonas como auxinas, citocininas o giberelinas. Estas incrementan la división celular, el tamaño de la raíces y por consiguiente una mejor absorción de nutrimentos.	Disminución de fertilizantes nitrogenados, de fósforo y potasio
<i>Burkholderia tropica</i> MTo 293 <i>Azospirillum</i> sp. SRGM2 <i>Pantoea eucalypti</i> M91 <i>Bacillus</i> sp. LMA5 <i>Azotobacter</i> sp. MFb1	[93] [94] [95] [90] [96]	Solubilización de fosfatos. El fósforo se adquiere por la solubilización de fósforo mineral por la acción microbiana	Se evita o disminuye el uso de fosfatos en las formulaciones de fertilizantes químicos.
<i>Burkholderia tuberum</i> STM678 <sup>†</sup> <i>B. subtilis</i> DN, MZ y BH <i>P. fluorescens</i> ABE66285	[97, 98] [99] [100]	ACC desaminasa. El ACC es el precursor del etileno, una molécula señal que dispara una respuesta de defensa elevada; lo cual consume energía. La ACC desaminasa destruye al ACC evitando la síntesis de etileno.	Se disminuye el desgaste de energía al evitar la síntesis de etileno. Además se produce amonio por lo que se podría disminuir el uso de fertilizantes químicos.

Tabla II. Ejemplos de bacterias que promueven el crecimiento de plantas mediante mecanismos indirectos.

Ejemplos de bacterias implicadas	Referencia	Mecanismo bacteriano ejercido, asociado a las plantas	Contribución
<i>Pseudomonas fluorescens</i> WCS417 <i>Bacillus subtilis</i> M4 <i>Pseudomonas chlororaphis</i> O6 <i>Paenibacillus polymyxa</i> B5	[103] [104] [105] [106]	Respuesta sistémica inducida por rizobacterias (ISR).	Previene del ataque de microorganismos patógenos. Resultando en plantas más sanas sin el uso de fungicidas o antibióticos. Se evita el uso de compuestos tóxicos para el humano y el ambiente.
<i>Azospirillum brasilense</i> (Sideróforos) <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> (Bacteriocinas) <i>B. tropica</i> MTo-293 (Sideróforos) <i>Pseudomonas putida</i> (Sideróforos y péptidos antimicrobianos)	[107] [108] [93]	Antagonismo contra patógenos	Elimina la presencia de microorganismos patógenos sensibles a la actividad antagonista. Evitando el uso de fungicidas o moléculas tóxicas contra esos microorganismos.
<i>Pseudomonas fluorescens</i> BL915 (elimina a <i>Rizoctonia solani</i> )	[109]	Control Biológico de plagas	Evita el uso de plaguicidas

Tabla III. Ejemplos de bacterias que degradan compuestos tóxicos asociados a las plantas.

Ejemplos de bacterias implicadas	Compuesto eliminado	Referencia	Mecanismo	Contribución
<i>Pseudomonas putida</i> KT2440	Compuestos aromáticos	[57]	Rizoremediación.	Eliminación de tóxicos orgánicos residuales o sus derivados (usados en agricultura) por la acción bacteriana asociada a plantas. Elimina los tóxicos que podrían impedir el buen desarrollo de algunos cultivos. Contribuye al crecimiento de plantas y frutos libres de tóxicos.
<i>Pseudomonas putida</i> DOT-T1E	Solventes orgánicos	[110]		
<i>Sphingomonas</i> sp. OF178	Lindano	[111]		
<i>Alcaligenes xylosoxydans</i>	Herbicidas (Atrazina y alacloro)	[82]		
<i>Klebsiella oxytoca</i>	Fijación de metales pesados como zinc y cadmio	[80]		
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Bifenilos policíclicos	[112]		

Adicionalmente, los miembros de la Red Comercializadora de Empresas Campesinas de Michoacán han iniciado un modelo que implica la nutrición de plantas en función de sus necesidades específicas (nutrición a la carta) (<http://redccam.com.mx/>), en el cual se determina lo que requiere la planta en el ambiente donde se desarrolla y luego se formula la alimentación adecuada. Dentro de su modelo también se están utilizando microorganismos benéficos para las plantas y ha planteado dejar de usar fertilizantes químicos para sustituirlos por fertilizantes orgánicos con el objetivo de contribuir a la disminución de la contaminación del planeta y aumentar la calidad de los productos agrícolas.

Por otro lado, los bajos rendimientos de los productos orgánicos provocan un alto precio para su producción [3, 66], a pesar de su mayor calidad para la salud humana [36], en este punto, los microorganismos benéficos podrían potenciar la producción de éstos cultivos. En este sentido, en México se está trabajando intensamente en la obtención de productos libres de tóxicos, para denominarlos como productos orgánicos; sin embargo, es necesario que se cuente con una regulación para precisar cuáles deben ser los requisitos necesarios para dar esta denominación, y para establecer la normativa que deben cumplir los fertilizantes orgánicos de buena calidad [101, 102]. Los fertilizantes orgánicos aún no han sido definidos y muchos de ellos transportan bacterias patógenas para los humanos por lo que aun tendrían que ser estudiados en la forma adecuada de su obtención e incluso incorporarles bacterias benéficas para evitar un desastre de brote de enfermedad infecciosa por el uso de un fertilizante orgánico no estudiado.

## VIII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La “revolución verde” ha traído beneficios de productividad de cultivos, así como severos efectos sobre el medio ambiente y la salud humana. Los microorganismos benéficos promotores del crecimiento vegetal incrementan la superficie de las raíces de las plantas lo que favorece una mejor absorción de los nutrientes adicionados a los cultivos y contribuyen de esta forma a la disminución de los efectos adversos provocados por los fertilizantes nitrogenados. Con el uso de estas tecnologías se puede optar por utilizar menos fertilizantes nitrogenados sin riesgo de la disminución del rendimiento de los cultivos. Adicionalmente, aquellos microorganismos que degradan compuestos tóxicos pueden ser clave para la detoxificación de suelos contaminados y por consecuencia aportar al impacto en la salud humana [113]. Desde nuestra perspectiva, los microorganismos acoplados a las plantas hacen más eficientes los sistemas agrícolas, incluyendo la absorción de agua por las plantas. Será de gran importancia para el medioambiente extender el uso de microorganismos benéficos [70], sin embargo, no hay que perder de

vista que es necesario realizar estudios de efectividad que avalen las características benéficas de éstos [71], así como efectuar estudios genómicos que demuestren que no contienen genes relacionados con la patogenicidad [72]. Los microorganismos se pueden acoplar con la agricultura orgánica, lo cual puede contribuir para disminuir los daños que se generan en la agricultura.

## RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a Redes PRODEP 2015-2016 (CA-262 and CA-244), DITCo2016 (3 y 4), VIEP-BUAP-2016 (00450, 00513, 00476, 00510) por el apoyo para fines de investigación. El primer autor de este trabajo es becario CONACYT, por lo que agradecemos a esta institución.

## REFERENCIAS

- [1] S. Friel, M. Akerman, T. Hancock, J. Kumaresan, M. Marmot, T. Melin, *et al.*, “Addressing the social and environmental determinants of urban health equity: evidence for action and a research agenda”, *J. Urban Health*, vol. 88(5), pp. 860–874, October 2011.
- [2] D. J. Connor, and M. I. Mínguez, “Evolution not revolution of farming systems will best feed and green the world”, *Glob Food Secur.*, vol. 1(2), pp. 106–113, December 2012.
- [3] V. Seufert, N. Ramankutty, and J. Foley, “Comparing the yields of organic and conventional agriculture”, *Nature*, vol. 485, pp. 229–232. April 2012.
- [4] J. H. Perkins, “The Rockefeller foundation and the green revolution, 1941-1956”, *Agric. Human Values*, vol. 7(3), pp. 6–18. June 1990.
- [5] F. Wu, and W. P. Butz, “The future of genetically modified crops; lessons from the green revolution”, In *RAND Science and Technology*, Santa Monica, USA, 2004. pp. 1–83.
- [6] B. H. Farmer, “The ‘green revolution’ in South Asian rice fields: environment and production”, *J. Dev. Stud.*, vol. 15(4), pp. 304–319. November, 1979.
- [7] S. C. Ray, and A. Ghose, “Production efficiency in Indian agriculture: an assessment of the post green revolution years”, *Omega*, vol. 44, pp. 58-69. April, 2014.
- [8] V. Shiva, “Chemical fertilizers and soil fertility”, in *The violence of the green revolution: Third World agriculture, ecology and politics*, vol. 1, Members of the Association of America University Presses. The University Press of Kentucky, USA, 2016, pp.103–116.
- [9] E. T. Lammerts van Bueren, S.S. Jones, L. Tamm, K. M. Murphy, J. R. Myers, C. Leifert, *et al.*, “The need to breed crop varieties suitable for organic farming, using wheat, tomato and broccoli as examples: A review”, *NJAS-Wageningen J. Life Sci.*, vol. 58(3-4), pp. 193–205. December 2011.
- [10] Y. Salinas-Moreno, C. García-Salinas, B. Coutiño-Estrada, and V. A. Vidal-Martínez, “Variabilidad en contenido y tipo de antocianinas en granos de color azul/morado de poblaciones mexicanas de maíz”, *Rev. Fototec. Mex.*, 36(3-A), pp. 285–294. October 2013.
- [11] R. E. Evenson, and D. Gollin, “Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000”, *Science*, vol. 300(5620), pp. 758–762. May 2003.
- [12] Y. E. Morales-García, D. Juárez-Hernández, C. Aragón-Hernández, M. A. Mascarúa-Esparza, M. R. Bustillos-Cristales, L. E. Fuentes-Ramírez, *et al.*, “Growth response of maize plantlets inoculated with *Enterobacter* sp. as a model for alternative agriculture”, *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 43(4), p.p. 287–293. December 2011.
- [13] S. Castro-Nava, J. A. López-Santillan, J. A. Pecina-Martínez, M. C. Mendoza-Castillo, and C. A. Reyes-Méndez, “Exploración de germoplasma nativo de maíz en el centro sur de Tamaulipas, México”, *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 4(4), pp. 645–653. Juny 2013.



- [14] M. R. Bellon, and J. Berthaud. “Traditional Mexican agricultural systems and the potential impacts of transgenic varieties on maize diversity”, *Agric. Human Values*, vol. 23(1), pp. 3–14. March 2006.
- [15] Z. L. Zhu, and D. L. Chen, “Nitrogen fertilizer use in China: contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies”, *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, vol. 63(2), pp. 117–127, July 2002.
- [16] R. R. Schrock, “Reduction of dinitrogen”, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 103(46), pp. 17087–17087, November 2006.
- [17] J. L. Gland, and V. N. Korchak, “Ammonia oxidation on a stepped platinum single-crystal surface”, *J. Catal.*, vol. 53(1), pp. 9–23, June 1978.
- [18] L. F. Razon, “Life cycle analysis of an alternative to the Haber-Bosch process: non-renewable energy usage and global warming potential of liquid ammonia from cyanobacteria”, *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 33(2), pp. 618–624. July 2014.
- [19] S. Barquera, J. Rivera-Dommarco, and A. Gasca-García, “Políticas y programas de alimentación y nutrición en México”, *Salud Pública Mex.*, vol. 43(5), pp. 464–477, October 2001.
- [20] S. Matassa, D. J. Batstone, T. Hulsen, J. Schnoor, and W. Verstraete, “Can direct conversion of used nitrogen to new feed and protein help feed the world?”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49(9), pp. 5247–5254, March 2015.
- [21] D. Tilman, and C. Lehman, “Human-caused environmental change: impacts on plant diversity and evolution”, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 98(10), pp. 5433–5440, May 2001.
- [22] A. F. Bouwman, A. H. W. Beusen, and G. Billen, “Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050”, *Glob. Biogeochem. Cycles*, vol. 23(GB0A04), pp. 1–16. December 2009.
- [23] A. F. Bouwman, A. H. W. Beusen, J. Griffioen, J. W. VanGroenigen, M. M. Hefting, O. Oenema, *et al.*, “Global trends and uncertainties in terrestrial denitrification and N<sub>2</sub>O emissions”, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B., Biol. Sci.*, vol. 368(1621-20130112), pp. 1–11. May 2013.
- [24] D. Tilman, K. G. Cassman, P. A. Matson, R. Naylor, and S. Polasky, “Agricultural sustainability and intensive production practices”, *Nature*, vol. 418, pp. 671–677. August 2002.
- [25] D. Fowler, J. A. Pyle, J. A. Raven, and M. A. Sutton, “The global nitrogen cycle in the twenty-first century: introduction”, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B., Biol. Sci.*, vol. 368(1621), pp. 20130165, May 2013.
- [26] B. E. Lapointe, L. W. Herren, D. D. Debortoli, and M. A. Vogel, “Evidence of sewage-driven eutrophication and harmful algal blooms in Florida's Indian River Lagoon”, *Harmful Algae*, vol. 43, pp. 82–102. March 2015.
- [27] W. H. Duewer, D. J. Wuebbles, H. W. Ellsaesser, and J. S. Chang, “NO<sub>x</sub> catalytic ozone destruction: sensitivity to rate coefficients”, *J. Geophys. Res.*, vol. 82, pp. 935–942, February 1977.
- [28] A. R. Moiser, “Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural systems and the atmosphere” *Plant Soil*, vol. 228(1), pp. 17–27. 2001.
- [29] M. A. Kox, and M. S. Jetten, “The nitrogen cycle”, in *Principles of plant-microbe interactions*, B. Lugtemberg, Ed., Springer International Publishing, Vol. 1, 2015, pp. 205–214.
- [30] R. H. Murray, D. V. Erler, and B. D. Eyre, “Nitrous oxide fluxes in estuarine environments: response to global change”, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 21(9), pp. 3219–3245. May 2015.
- [31] V. P. Aneja, W. H. Schlesinger, and S. P. Aneja, “Effects of intensively managed agriculture on the atmospheric environment”, *Air Waste Manag. Assoc.*, vol. 65, pp. 24–30. June 2015.
- [32] K. M. Norderhaug, H. Gundersen, A. Pedersen, F. Moy, N. Green, M. G. Walday, *et al.*, “Effects of climate and eutrophication on the diversity of hard bottom communities on the Skagerrak coast 1990-2010”, *MEPS*, vol. 530, pp. 29–46. June 2015.

- [33] A. Binzer, C. Guill, B. C. Rall, U. Brose, “Interactive effects of warming, eutrophication and size structure: impacts on biodiversity and food web structure”, *Glob. Chang. Biol.*, vol. 22(1), pp. 220–227, January 2016.
- [34] O. Rodríguez-Andrade, L. E. Fuentes-Ramírez, Y. E. Morales-García, D- Molina-Romero, M. R. Bustillos-Cristales, R. D. Martínez-Contreras, *et al.*, “The decrease in the population of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane after nitrogen fertilization is related to plant physiology in split root experiments”, *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 47(4), pp. 335–343. December 2015.
- [35] A. Heeb, B. Lundegardh, T. Ericsson, and G. P. Savage, “Nitrogen form affects yield and taste of tomatoes”, *J. Sci. Food Agric.*, vol. 85(8), pp. 1405–1414. February 2005.
- [36] A. F. Vinha, S. V. Barreira, A. S. Costa, R. C. Alves, and M. B. P. Oliveira, “Organic versus conventional tomatoes: Influence on physicochemical parameters, bioactive compounds and sensorial attributes”, *Food Chem. Toxicol.*, vol. 67, pp. 139–144. May 2014.
- [37] A. S. Richey, B. F. Thomas, M. H. Lo, J. S. Famiglietti, S. Swenson, and M. Rodell, “Uncertainty in global groundwater storage estimates in a total groundwater stress framework”, *Water Resour. Res.*, vol. 51(7), pp. 5198–5216. July 2015.
- [38] R. Barthel, R. Ziller, A. Leinberger, and T. Hörhan. “Changes to the quantitative status of groundwater and the water supply”, In *Regional Assessment of Global Change Impacts*. vol. 1, W. Mauser, and M. Prash, Eds., Switzerland: Springer International Publishing, 2016, pp. 561–567.
- [39] M. Barlow, “The global water crisis and the commodification of the world's water supply. National Chairperson”, in *Council of Canadians Chair, IFG Committee on the Globalization of Water*. Blue Gold. Spring, 2001, p. 1–87.
- [40] R. Roach, “Dried up, drowned out. Voices from the developing world on a changing climate”, Tearfund, Teddington, Middlesex, United Kingdom; 2005, p.52.
- [41] P. Romero Lankao, “Water in Mexico City: what will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities?”, *Environ. Urban.*, vol. 22(1), pp. 157–178. April 2010.
- [42] N. J. Felstead, M. J. Leng, S. E. Metcalfe, and S. Gonzalez, “Understanding the hydrogeology and surface flow in the Cuatrociénegas Basin (NE Mexico) using stable isotopes”, *J. Arid Environ.*, vol. 121, pp. 15–23. October 2015.
- [43] S. Pajares, L. E. Eguiarte, G. Bonilla-Rosso, and V. Souza, “Drastic changes in aquatic bacterial populations from the Cuatro Ciénegas Basin (Mexico) in response to long-term environmental stress”, *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 104(6), pp. 1159–1175. December 2013.
- [44] E. W. Carson, V. Souza, H. Espinosa-Pérez, T. F. Turner, “Mitochondrial DNA diversity and phylogeography of *Lucania interioris* inform biodiversity conservation in the Cuatro Ciénegas Basin, México”, *West N. Am. Nat.*, vol. 75(2), pp. 200-208, August 2015.
- [45] C. R. Murussi, M. D. Costa, J. W. Leitemperger, L. Guerra, C. C. Rodrigues, C. C. Menezes, *et al.*, “Exposure to different glyphosate formulations on the oxidative and histological status of *Rhamdia quelen*”, *Fish physiol. Biochem.*, vol. 42(2), pp. 445–455. April 2016.
- [46] K. L. Smalling, R. Reeves, E. Muths, M. Vandever, W. A. Battaglin, M. L. Hladik, *et al.*, “Pesticide concentrations in frog tissue and wetland habitats in a landscape dominated by agriculture”. *Sci. Total Environ.*, vol. 502(1), pp. 80-90. January 2015.
- [47] K. Steffens, N. Jarvis, E. Lewan, B. Lindström, J. Kreuger, E. Kjellström, *et al.*, “Direct and indirect effects of climate change on herbicide leaching-A regional scale assessment in Sweden”, *Sci. Total Environ.*, vol. 514, pp. 239–249. May 2015.
- [48] M. M. Newman, N. Hoilett, N. Lorenz, R. P. Dick, M. R. Liles, C. Ramsier, *et al.*, “Glyphosate effects on soil rhizosphere-associated bacterial communities”, *Sci. Total Environ.*, vol. 543(A), pp. 155–160, February 2016.

- [49] Y. Kawaratani, T. Matsuoka, Y. Hirata, N. Fukata, Y. Nagaoka, and S. Uesato, "Influence of the carbamate fungicide benomyl on the gene expression and activity of aromatase in the human breast carcinoma cell line MCF-7", *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, vol. 39(1), pp. 292–299. January 2015.
- [50] J. Zhou, K. Xiong, Y. Yang, X. Ye, J. Liu, and F. Li, "Deleterious effects of benomyl and carbendazim on human placental trophoblast cells", *Reprod. Toxicol.*, vol. 51, pp. 64–71. January 2015.
- [51] A. Ganguli, D. Choudhury, and G. Chakrabarti, "2, 4-Dichlorophenoxyacetic acid induced toxicity in lung cells by disruption of the tubulin-microtubule network", *Toxicol. Res.*, vol. 3(2), pp. 118–130. January 2014.
- [52] G. Echeverry, A. M. Zapata, M. I. Páez, F. Méndez, M. Peña, "Valoración del riesgo en salud en un grupo de población de Cali, Colombia, por exposición a plomo, cadmio, mercurio, ácido 2, 4-diclorofenoxiacético y diuron, asociada al consumo de agua potable y alimentos", *Biomédica*, vol. 35(Supl 2), pp. 110–19, August 2015.
- [53] S. J. Rocha Eiroa, M. T. Ferreiro Losada, and M. I. Regal Faraldo, "Cáncer cutáneo por exposición ocupacional a agentes químicos", *Med. Segur. Trab.*, vol. 60(235), pp. 434–454, June 2014.
- [54] D. Loomis, K. Guyton, Y. Grosse, F. El Ghissasi, V. Bouvard, L. Benbrahim-Tallaa, *et al.*, "Carcinogenicity of lindane, DDT, and 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid", *Lancet Oncol.*, vol. 16(8), pp. 891–892. August 2015.
- [55] A. Hernández-Antonio, and A. M. Hansen, "Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos", *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 27(2), pp. 115–127. April 2011.
- [56] Z. Zhao, H. Zeng, J. Wu, and L. Zhang, "Organochlorine pesticide (OCP) residues in mountain soils from Tajikistan", *Environ. Sci. Process. Impacts*, vol. 15(3), pp. 608–616. January 2013.
- [57] P. Van Dillewijn, A. Caballero, J. A. Paz, M. M. González-Pérez, J. M. Oliva, J. L. Ramos, "Bioremediation of 2,4,6-Trinitrotoluene under field conditions", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41(4), pp. 1378–1383. January 2007.
- [58] M. Vila, S. Lorber-Pascal, and F. Laurent, "Fate of RDX and TNT in agronomic plants", *Environ. Pollut.*, vol. 148(1), pp. 148–154. July 2007.
- [59] R. Juraske, C. S. Mosquera Vivas, A. Erazo Velásquez, G. García Santos, M. B. Berdugo Moreno, J. Diaz Gomez, *et al.*, "Pesticide uptake in potatoes: model and field experiments", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45(2), pp. 651–657. January 2011.
- [60] L. Hardell, S. O. Andersson, M. Carlberg, L. Bohr, B. van Bavel, G. Lindström, *et al.*, "Adipose tissue concentrations of persistent organic pollutants and the risk of prostate cancer", *J. Occup. Environ. Med.*, vol. 48(7), pp. 700–707. July 2006.
- [61] J. P. Arrebola, M. F. Fernández, P. Martín-Olmedo, J. M. Molina-Molina, M. J. Sánchez-Pérez, E. Sánchez-Cantalejo, *et al.*, "Adipose tissue concentrations of persistent organic pollutants and total cancer risk in an adult cohort from Southern Spain: Preliminary data from year 9 of the follow-up", *Sci. Total Environ.*, vol. 500-501, pp. 243–249. December 2014.
- [62] M. A. Ashraf, "Persistent organic pollutants (POPs): a global issue, a global challenge", *Environ. Sci. Pollut. Res. Ahead of print*, 1–5, September 2015.
- [63] J. E. Lim, S. H. Park, S. H. Jee, H. Park, "Body concentrations of persistent organic pollutants and prostate cancer: a meta-analysis", *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 22(15), pp. 11275–11284. March 2015.
- [64] L. G. Pruneda-Álvarez, T. Ruiz-Vera, and I. N. Pérez-Maldonado, "Exposición no ocupacional a tolueno en diferentes escenarios de México", *Rev. Iberoam. Cienc.*, vol. 2(3), pp. 1–8, May 2015.
- [65] T. De Ponti, B. Rijk, M. K. van Ittersum, "The crop yield gap between organic and conventional agriculture", *Agric. Syst.*, vol. 108, pp. 1–9, April 2012.
- [66] D. J. Connor, "Organically grown crops do not a cropping system make and nor can organic agriculture nearly feed the world", *Field Crops. Res.*, vol. 144, pp. 145–147, March 2013.

- [67] L. K. Abbott, and D. A. C Manning, “Soil health and related ecosystem services in organic agriculture”, *Sustain. Agric. Res.*, vol. 4(3), pp. 116–125. June 2015.
- [68] Y. E. Morales-García, J. de la Torre-Zuñiga, E. Duque, R. Pérez-y-Terrón, L. Martínez-Martínez, R. Martínez-Contreras, *et al.*, “Aspectos críticos a considerar para el aislamiento de bacterias benéficas”, *Saberes Compartidos, Rev. Invest. Cient. Tecnol. Hum.*, vol. 11(7), pp. 54–62. June 2013.
- [69] Y. E. Morales-García, E. Duque, O. Rodríguez-Andrade, J. de la Torre, R. D. Martínez-Contreras, R. Pérez-y-Terrón, *et al.*, “Bacterias preservadas, una fuente importante de recursos biotecnológicos”, *BioTecnología*, vol. 14 (2), pp. 11–29. December 2010.
- [70] D. Molina-Romero, M. R. Bustillos-Cristales, O. Rodríguez-Andrade, Y. E. Morales-García, Y. Santiago-Saenz, M. Castañeda-Lucio *et al.*, “Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico”, *Biológicas*, vol. 17(2), pp. 24–34, December 2015.
- [71] B. Lugtemberg, and F. Kamilova, “Plant-Growth-promoting rhizobacteria”, *Annu. Rev. Microbiol.*, vol. 63, pp. 541–556, October 2009.
- [72] R. Vivanco-Calixto, D. Molina-Romero, Y. E. Morales-García, V. Quintero-Hernández, A. Munive-Hernández, A. Baez-Rogelio, *et al.*, “Reto agrobiotecnológico: inoculantes de segunda generación” *Alianzas y Tendencias OCT-DITCo*, vol. 1(1), pp. 9–19. April 2016.
- [73] B. Mitter, G. Brader, M. Afzal, S. Compant, M. Naveed, F. Trognitz, *et al.*, “Advances in elucidating beneficial interactions between plants, soil and bacteria”, in: *Advances in Agronomy*, vol. 121, D. L. Sparks, ed, Newark, Delaware, USA, Academic Press, Elsevier Inc., 2013., pp. 381–445.
- [74] P. Bonfante, and A. Genre, “Arbuscular mycorrhizal dialogues: do you speak ‘plantish’ or ‘fungish’?”, *Trends Plant Sci.*, vol. 20(3), pp. 150–154. March 2015.
- [75] J. Muñoz-Rojas, and J. Caballero-Mellado, “Population dynamics of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in sugarcane cultivars and its effect on plant growth”, *Microb. Ecol.*, vol. 46(4), pp. 454–464. December 2003.
- [76] P. C. Abhilash, J. R. Powell, H. B. Singh, B. K. Singh, “Plant–microbe interactions: novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies”, *Trends Biotechnol.*, vol. 30(8), pp. 416–420, August 2012.
- [77] B. R. Glick, “Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications”, *Scientifica*, vol. 2012(ID963401), pp. 1–15, September 2012.
- [78] K. P. Shukla, S. Sharma, N. K. Singh, V. Singh, K. Tiwari, and S. Singh, “Nature and role of root exudates: efficacy in bioremediation”, *Afr. J. Biotechnol.*, vol. 10(48), pp. 9717–9724, August 2013.
- [79] D. Egamberdieva, and B. Lugtenberg, “Use of plant growth-promoting rhizobacteria to alleviate salinity stress in plants”, in *Use of microbes for the alleviation of soil stresses*, vol. 1, M. Miransari, ed., Springer, New York, Heidelberg Dordrecht London, 2014, pp. 73–96.
- [80] R. Dixit, D. Malaviya, K. Pandiyan, U. B. Singh, A. Sahu, R. Shukla, *et al.*, “Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes”, *Sustainability*, vol. 7(2), pp. 2189–2212. February 2015.
- [81] S. Dobbelaere, A. Croonenborghs, A. Thys, D. Ptacek, J. Vanderleyden, P. Dutto, *et al.*, “Responses of agronomically important crops to inoculation with *Azospirillum*”, *Aust. J. Plant Physiol.*, vol. 28(9), pp. 871–879. September 2001.
- [82] A. E. M. Chirnside, W. F. Ritter, and M. Radosovich, “Isolation of a selected microbial consortium from a pesticide-contaminated mix-load site soil capable of degrading the herbicides atrazine and alachlor”, *Soil Biol. Biochem.*, vol. 39(12), pp. 3056–3065, December 2007.
- [83] M. McGuinness, D. and Dowling, “Plant-associated bacterial degradation of toxic organic compounds in soil”, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 6(8), pp. 2226–2247, August 2009.
- [84] B. Balderrama, A. Dávalos, L. Girad, E. Morett, and J. Mora, “Regulatory proteins and *cis*-acting elements involved in the transcriptional control of *Rhizobium etli* reiterated *nifH* genes”, *J. Bacteriol.*, vol. 178(11), pp. 3119–3126, June 1996.

- [85] B. J. R. Alves, R. M. Boddey, and S. Urquiaga, “The success of FBN in soybean in Brazil”, *Plant Soil*, vol. 252(1), pp. 1–9, May 2003.
- [86] H. B. Machado, S. Funayama, L. U. Rigo, and F. O. Pedrosa, “Excretion of ammonium by *Azospirillum brasilense* mutants resistant to ethylenediamine”, *Can. J. Microbiol.*, vol. 37(7), pp. 549–553, July 1991.
- [87] M. Sevilla, R. H. Burris, N. Gunapala, C. Kennedy, “Comparison of benefit to sugarcane plant growth and  $^{15}\text{N}_2$  incorporation following inoculation of sterile plants with *Acetobacter diazotrophicus* wild-type and *Nif*-mutant strains”, *Mol. Plant-Microb. Interact.*, vol. 14(3), pp. 358–66, March 2001.
- [88] A. Guzmán, M. Obando, D. Rivera, and R. Bonilla, “Selección y caracterización de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal (RPCV) asociadas al cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*)”, *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. XIV(1), pp. 182–90, July 2012.
- [89] T. Jimenez-Salgado, L. E. Fuentes-Ramirez, A. Tapia-Hernandez, M. A. Mascarua-Esparza, E. Martinez-Romero, J. Caballero-Mellado, “*Coffea arabica* L., a new host plant for *Acetobacter diazotrophicus*, and isolation of other nitrogen-fixing acetobacteria”, *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 63(9), pp. 3676–3683, September 1997.
- [90] V. N. Kavamura, S. N. Santos, J. L. Silva, M. M. Parma, L. A. Avila, A. Visconti, *et al.*, “Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought”, *Microbiol. Res.*, vol. 168(4), pp. 183–191, May 2013.
- [91] J. Koga, T. Adachi, H. Hidaka, “IAA biosynthetic pathway from tryptophan via indole-3-pyruvic acid in *Enterobacter cloacae*”, *Agric. Biol. Chem.*, vol. 55(3), pp. 701–706, August 1991.
- [92] F. Bastián, A. Cohen, P. Piccoli, V. Luna, R. Baraldi, and R. Bottini, “Production of indole-3-acetic acid and gibberellins A1 and A3 by *Acetobacter diazotrophicus* and *Herbaspirillum seropedicae* in chemically-defined culture media”, *Plant Growth Regul.*, vol. 24(1), pp. 7–11, January 1998.
- [93] S. Tenorio-Salgado, R. Tinoco, R. Vazquez-Duhalt, J. Caballero-Mellado, and E. Pérez-Rueda, “Identification of volatile compounds produced by the bacterium *Burkholderia tropica* that inhibit the growth of fungal pathogens” *Bioengineered*, vol. 4(4), pp. 236–243, July 2013.
- [94] D. M. Cárdenas-Caro, M. F. Garrido-Rubiano, B. A. Roncallo-Fandiño, R. R. and Bonilla-Buitrago, “Inoculation with *Azospirillum* spp and *Enterobacter agglomerans* in Guinea grass (*Panicum maximum* Jacq.) in the Cesar Department (Colombia)”, *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín*, vol. 67(2), pp. 7271–7280, June 2014.
- [95] L. N. Castagno, M. J. Estrella, A. I. Sannazzaro, A. Grassano, and O. A. Ruiz, “Phosphate-solubilization mechanism and *in vitro* plant growth promotion activity mediated by *Pantoea eucalypti* isolated from *Lotus tenuis* rhizosphere in the Salado River Basin (Argentina)”, *J. Appl. Microbiol.*, vol. 110(5), pp. 1151–1165, March 2011.
- [96] A. Valery, and I. Reyes, “Evaluation of growth promoting rhizobacteria under different fertilization schemes in maize variety HIMECA-95” *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. 15(2), pp. 80–88, July 2013.
- [97] P. Vandamme, J. Goris, W. M. Chen, P. de Vos, and A. Willems, “*Burkholderia tuberum* sp. nov. and *Burkholderia phymatum* sp. nov. nodulate the roots of tropical legumes”, *Syst. Appl. Microbiol.*, vol. 25(4), pp. 507–12, December 2002.
- [98] J. Onofre-Lemus, I. Hernández-Lucas, L. Girard, and J. Caballero-Mellado, “ACC (1-aminocyclopropane-1-carboxylate) deaminase activity, a widespread trait in *Burkholderia* species, and its growth-promoting effect on tomato plants”, *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 75(20), pp. 6581–6590, May 2009.
- [99] B. E. Gómez-Luna, A. Hernández-Morales, C. H. Herrera-Méndez, G. Arroyo-Figueroa, L. Vargas-Rodríguez, and V. Olalde-Portugal, “Isolation of plant growth promoting rhizobacteria of guava plants (*Psidium guajava*)”, *Ra Ximhai*, vol. 8(3a), pp. 97–102, September 2012.
- [100] M. A. Jorquera, B. Shaharoon, S. M. Nadeem, M. de la Luz Mora, D. E. Crowley, “Plant growth-promoting rhizobacteria associated with ancient clones of *Creosote Bush* (*Larrea tridentata*)”, *Microb. Ecol.*, vol. 64(4), pp. 1008–1017, November 2012.



- [101] M. Ahemad, M. Kibret, “Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective”, J. King Saud University-Sci., vol. 26(1), pp. 1–20, January 2014.
- [102] Y. Bashan, L. E. de-Bashan, S. R. Prabhu, J. P. Hernandez, “Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013)”, Plant Soil, vol. 378(1-2), pp. 1–33, May 2014.
- [103] C. M. J. Pieterse, S. C.M. van Wees, J. A. van Pelt, M. Knoester, R. Laan, H. Gerrits, *et al.*, “A novel signalling pathway controlling induced systemic resistance in Arabidopsis”, Plant Cell, vol. 10(9), pp. 1571–1580, September 1998.
- [104] M. Ongena, F. Duby, E. Jourdan, T. Beaudry, V. Jadin, J. Dommes, *et al.*, “*Bacillus subtilis* M4 decreases plant susceptibility towards fungal pathogens by increasing host resistance associated with differential gene expression”, Appl. Microbiol. Biotechnol., vol. 67(5), pp. 692–698, June 2005.
- [105] P. Myung Ryeol, Y. Cheol Kim, J. Yeon Park, S. He Hang, K. Yong Kim, S. Woo Lee, *et al.*, “Identification of an ISR-related metabolite produced by *Pseudomonas chlororaphis* O6 against the wildfire pathogen *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci* in Tobacco”, J. Microbiol. Biotechnol., vol. 18(10), pp. 1659–1662, October 2008.
- [106] W. M. Haggag, “Colonization of exopolysaccharide-producing *Paenibacillus polymixa* on peanut roots for enhancing resistance against crown rot disease”, Afr. J. Biotechnol., vol. 6(13), pp. 1568–1577. July 2007.
- [107] A. Tapia-Hernández, M. A. Mascarúa-Esparza, and J. Caballero-Mellado, “Production of bacteriocins and siderophore-like activity by *Azospirillum brasilense*”, Microbios, vol. 64(259), pp. 73–83, January 1990.
- [108] D. Piñon, M. Casas, M. Blanch, B. Fontaniella, Y. Blanco, C. Vicente, *et al.*, “*Gluconacetobacter diazotrophicus*, a sugar cane endosymbiont, produces a bacteriocin against *Xanthomonas albilineans*, a sugar cane pathogen”, Res. Microbiol., vol. 153(6), pp. 345–351, July 2002.
- [109] T. D. Gaffney, S. T. Lam, J. Ligon, K. Gates, A. Frazelle, J. Di Maio, *et al.*, “Global regulation of expression of antifungal factors by *Pseudomonas fluorescens* biological control strain”, Mol. Plant Microbe Interact., vol. 7(4), pp. 455–463, April 1994.
- [110] A. Segura, L. Molina, S. Fillet, T. Krell, P. Bernal, J. Muñoz-Rojas, *et al.*, “Solvent tolerance in Gram-negative bacteria”, Curr. Opin. Biotechnol., vol. 23(3), pp. 415–421. June 2012.
- [111] D. Böltner, P. Godoy, J. Muñoz-Rojas, E. Duque, S. Moreno-Morillas, L. Sánchez, and J. L. Ramos, “Rhizoremediation of lindane by root-colonizing *Sphingomonas*”, Microb. Biotechnol., vol. 1(1), pp. 87–93, January 2008.
- [112] G. M. Brazil, L. Kenefick, M. Callanan, A. Haro, V. de Lorenzo, D. N. Dowling *et al.*, “Construction of a rhizosphere pseudomonad with potential to degrade polychlorinated biphenyls and detection of *bph* gene expression in the rhizosphere”, Appl. Environ. Microbiol., vol. 61(5), pp. 1946–1952, May 1995.
- [113] A. Baez-Rogelio, Y. E. Morales-García, V. Quintero-Hernández, and J. Muñoz-Rojas, “Next generation of microbial inoculants for agriculture and bioremediation”, Microb. Biotechnol., Epub. Ahead of Print, doi: 10.1111/1751-7915.12448. October 2016.