

APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



Capítulo 13

Uso y manejo del microbioma para el desarrollo de bioinsumos de uso agrícola

Nora Altier, Eduardo Abreo, Elena Beyhaut, Federico Rivas,
Claudia Barlocco y Silvia Garaycochea

1. La sostenibilidad de los agroecosistemas bajo el concepto de una sola salud

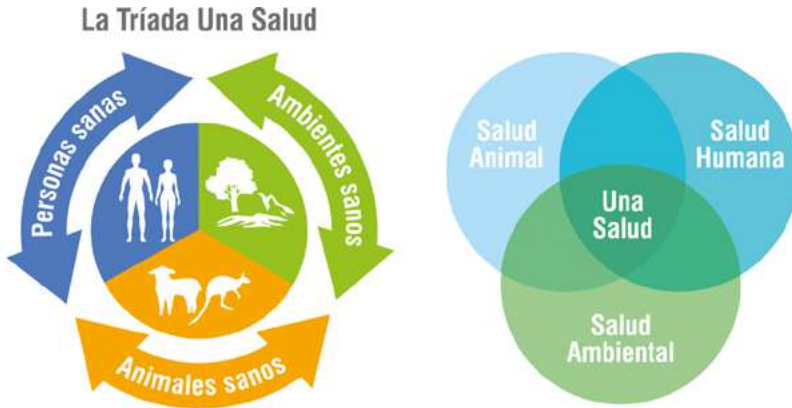
El uso intensivo del recurso suelo en la producción agropecuaria y la utilización creciente de agroquímicos plantean una amenaza a la sostenibilidad de los agroecosistemas. Existe un conocimiento cada vez más relevante del efecto adverso que estos factores tienen en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, en particular sobre los microorganismos y sus funciones en el ciclado de nutrientes, la salud del suelo, la salud de los cultivos y el consecuente mantenimiento de la productividad de los sistemas agrícolas (Aktar *et al.*, 2009; Brühl y Zaller, 2019; FAO, 2018).

La demanda de productos agrícolas saludables, alimentos inocuos y la preocupación de la sociedad por los efectos negativos de la producción agropecuaria sobre el ecosistema (ejemplos: agroquímicos, fósforo y eutrofización de los cursos de agua, nitrógeno y contaminación de las napas freáticas) requieren la generación de tecnologías más amigables con el ambiente, que aseguren productos de mayor calidad total. La importancia de este problema excede las preocupaciones productivas y del manejo del agroecosistema, involucrando a la sociedad en su conjunto y en particular a los responsables de la toma de decisiones en políticas públicas.

En tiempos de la pandemia por COVID-19, a nivel mundial toma fuerza el concepto de “una sola salud” (*One health*), que resume una noción conocida desde hace más de un siglo: la salud humana y la salud animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas en los cua-

les coexisten (Altier y Abreo, 2020; OIE, 2020; FAO, 2011). La iniciativa *One health*, representada por la tríada “*healthy people, healthy animals, healthy environments*”, es un enfoque en el que múltiples sectores trabajan juntos para lograr mejores resultados en la salud pública (Figura 1) (Thompson, 2013). El año 2020 fue declarado Año Internacional de la Salud Vegetal por las Naciones Unidas; en este contexto, desde las ciencias agrarias es fundamental señalar la necesidad de incluir la salud de las plantas y su microbioma dentro del concepto *One health*, por cuanto está íntimamente ligada a la salud del ambiente, del suelo, de los animales y las personas (Altier y Abreo, 2020).

FIGURA 1. CONCEPTO “UNA SALUD” (*ONE HEALTH*), REPRESENTADO POR LA TRÍADA “PERSONAS SANAS, ANIMALES SANOS, AMBIENTES SANOS” (*HEALTHY PEOPLE, HEALTHY ANIMALS, HEALTHY ENVIRONMENTS*)



Fuente: Thompson (2013).

Las plantas y su microbioma son la base de la vida en la Tierra. El microbioma comprende la comunidad de microorganismos asociados a la planta y a su ambiente, que en forma conjunta definen la salud de las plantas y su productividad (Leach *et al.*, 2017). El microbioma no solo es parte fundamental del funcionamiento de las plantas en su estado natural o en cultivos, sino que, además, puede ser manejado por el hombre para mejorar los sistemas productivos y ser usado como recurso a par-

tir del cual obtener microorganismos benéficos, con funciones deseables para la nutrición y protección de las plantas (Trivedi *et al.*, 2021).

Las plantas producen el 98% del oxígeno que respiramos y proporcionan más del 80% de los alimentos que consumimos; son fuente primaria de ingresos y desarrollo económico. Asimismo, los hábitats naturales son recursos esenciales para el sustento de los servicios ecosistémicos. En otras palabras, las plantas y su microbioma son “custodias” de nuestro aire, nuestro alimento y nuestro ambiente. Una amenaza para la salud de las plantas es también una amenaza para la salud, el bienestar y la prosperidad de la sociedad y de las personas que la componen. Ejemplos históricos son: la epidemia del tizón tardío de la papa (causada por *Phytophthora infestans*), que desencadenó la hambruna irlandesa de 1845, matando millones de personas (Schumann y D’Arcy, 2017); la devastación de cultivos y pasturas causada por las langostas, plagas bíblicas que resurgen cada vez con mayor frecuencia y voracidad (Le Gall *et al.*, 2019); la ocurrencia de micotoxinas en alimentos de origen vegetal y animal, que desafían la inocuidad alimentaria (Reddy *et al.*, 2010, Cea, 2006). Cada año, las enfermedades y plagas son responsables de pérdidas promedio de hasta 40% en la producción mundial de alimentos, costando a la economía más de US\$ 220 billones (APS, 2020). La salud de los hábitats naturales también debe ser especialmente atendida, ya que estos son recursos que proporcionan diversos servicios al ecosistema. De la salud de las plantas y los cultivos depende el sustento mundial de la producción de alimentos; protegerla es garantizar la seguridad y la inocuidad alimentarias, esenciales para promover el bienestar y la salud humana (FAO, 2017).

Por otro lado, las prácticas agrícolas que basan el manejo sanitario de los cultivos en el uso exclusivo de agroquímicos implican un riesgo para la salud humana, por exposición directa o indirecta a la presencia de residuos químicos en los alimentos consumidos (Aktar *et al.*, 2009). Además, tienen un impacto negativo para el ambiente, cuando afectan organismos-no-blanco o comprometen la calidad de los cursos de agua y el suelo, y, como consecuencia, “enferman a los agroecosistemas” (Brühl y Zaller, 2019; Pérez-Parada *et al.*, 2018).

En el contexto de una producción agroecológica basada en la gestión sostenible de los recursos naturales, se ha promovido el Manejo Integrado de Plagas (MIP) para reducir el uso de plaguicidas y mitigar los efectos negativos sobre la salud humana y ambiental (Ehler, 2006; Radcliffe *et al.*, 2009). La resistencia genética, el control cultural y el control biológico

gico han contribuido a alcanzar esa meta, racionalizando el uso de agroquímicos. Sin embargo, uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la investigación en salud vegetal es demostrar la efectividad y confiabilidad de estrategias alternativas al uso exclusivo de agroquímicos, con la finalidad de incrementar la calidad y la cantidad de alimentos producidos, asegurando simultáneamente la sostenibilidad de los ecosistemas y un ingreso rentable para los productores. Recientemente se ha fortalecido el concepto de *Agroecological Crop Protection* (ACP, Protección agroecológica de cultivos), que favorece el desarrollo de tecnologías para la promoción de transiciones agroecológicas con abordaje ecosistémico a escala de paisaje y regional (Deguine *et al.*, 2017).

La noción de intensificación sostenible de los sistemas productivos requiere gestionar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, mediante la promoción de estrategias para el manejo sanitario y nutricional de los cultivos que mitiguen los riesgos asociados al uso de plaguicidas y fertilizantes de síntesis química. Esto implica aumentar la inversión en capacidades de investigación y difusión con foco en la salud de las plantas y el cuidado de la salud del suelo como fuente de nutrientes. Asimismo, se requiere fortalecer la formación de recursos humanos en el área de la salud de las plantas, incorporando el concepto de una sola salud a las currícula de las carreras universitarias.

Queenan *et al.* (2017) sostienen que el desarrollo de la humanidad y las intervenciones antrópicas han generado externalidades negativas para los ecosistemas, en tanto la pérdida de biodiversidad y de los servicios ecosistémicos, la polución del aire y del agua y el cambio climático amenazan con revertir las ganancias obtenidas en la salud pública. Se plantea la necesidad de un cambio de paradigma, en el que es fundamental considerar un abordaje integrado para el estudio de la salud humana, animal, vegetal y del ecosistema, desde un enfoque socioecológico. Los autores proponen que los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2015) ofrecen una oportunidad única para trabajar el concepto de una sola salud, analizando y reordenando su integración e interdependencia (Figura 2).

FIGURA 2. PROPUESTA DE AGRUPAMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE, BASADOS EN EL CONCEPTO “UNA SOLA SALUD” (ONE HEALTH)



Fuente: Queenan et al. (2017).

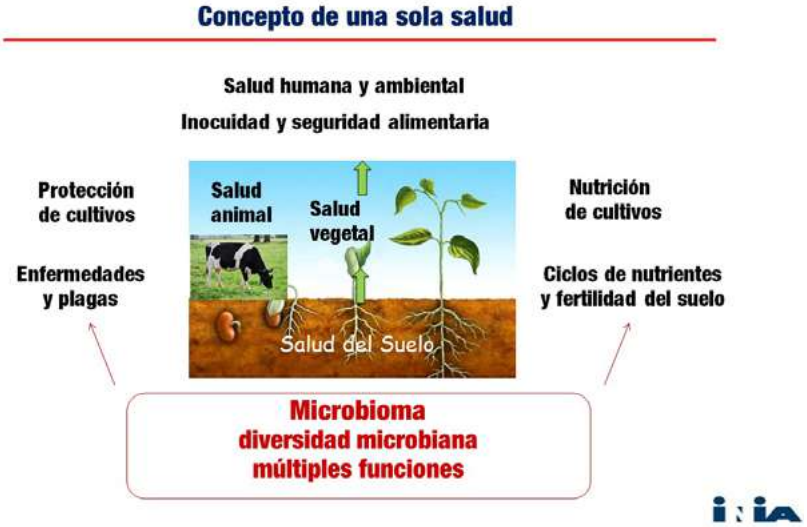
Rattan Lal, recipiente del *2020 World Food Prize*, sostiene que “la salud del suelo, de las plantas, de los animales, de las personas y de los ecosistemas es una e indivisible”. Comprender este concepto es clave para promover el bienestar humano y contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (Lal, 2018).

2. El microbioma y las funciones ecosistémicas con foco en la protección y nutrición vegetal

Las comunidades microbianas de la rizosfera y del suelo y los microorganismos endófitos y simbiotes, llamados en su conjunto *microbioma*, juegan un rol esencial en el mantenimiento de la salud del suelo y, por tanto, de la salud del ecosistema global (Figura 3) (Altier y Abreo, 2020;

Altier *et al.*, 2020a). Intervienen en diversos procesos ecosistémicos importantes, incluidos el ciclado y la absorción de nutrientes (carbono, fósforo y nitrógeno), la formación y la fertilidad del suelo (Van der Heijden *et al.*, 2008), y la supresión y control de patógenos y plagas de los cultivos (Garbeva *et al.*, 2004; Kinkel *et al.*, 2011; Stenberg *et al.*, 2021). Están estrechamente asociados a los ciclos biogeoquímicos, los flujos de energía y la degradación de contaminantes. A través de las funciones que cumple, el microbioma es determinante de la salud y la productividad de los cultivos.

FIGURA 3. EL CONCEPTO DE “UNA SOLA SALUD” DA MARCO AL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN BIOINSUMOS



Fuente: Elaboración propia.

Los organismos del microbioma forman redes complejas que están reguladas por medio del ciclado de nutrientes, la competencia, el antagonismo y la comunicación química mediada por un espectro diverso de moléculas de señalización (Leach *et al.*, 2017). A su vez, la diversidad microbiana está influenciada por factores bióticos y abióticos como las propiedades edáficas, la temperatura, la humedad y el tipo de vegetación (Garbeva *et al.*, 2004). El pH del suelo, el contenido de C orgánico, de N

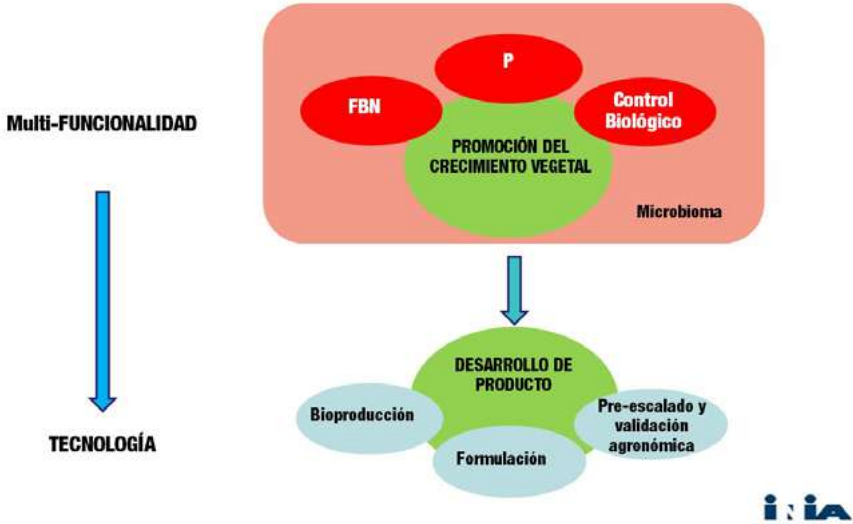
y de P son algunos de los factores que determinan el ensamblaje microbiano, las interacciones y las funciones resultantes (Garaycochea *et al.*, 2020).

Comprender la estructura y las funciones del microbioma favorece intervenciones agronómicas basadas en una visión ecológica de los sistemas productivos y puede conducir a nuevas estrategias biológicas, químicas y fitogenéticas para mejorar la salud y la productividad de los cultivos. Genera una oportunidad para la investigación y el desarrollo de tecnologías que buscan potenciar a los microorganismos como un recurso genético de múltiples aplicaciones en la nutrición y la sanidad de las plantas (Altier *et al.*, 2013b; Trivedi *et al.*, 2021). Si bien los microorganismos están en la base del funcionamiento sostenible de los agroecosistemas, existen limitaciones tecnológicas al desarrollo de productos microbianos debidamente formulados que puedan ser usados en los diversos sistemas productivos, o frente a condiciones climáticas no favorables para su desarrollo (Berg, 2009; Glare *et al.*, 2012; Köhl *et al.*, 2011).

En Uruguay y en el INIA, las disciplinas asociadas a la protección vegetal (fitopatología, entomología, malherbología), a las ciencias del suelo y la nutrición de cultivos (microbiología y biología del suelo) y a la biotecnología han contribuido significativamente a preservar la salud de las plantas, generando conocimientos y brindando estrategias, tecnologías innovadoras e integradas, que promueven un manejo fitosanitario y nutricional seguro para la salud humana y animal, en forma amigable con el ambiente (Allegrí, 2014; Altier *et al.*, 2013a, Mondino *et al.*, 2014).

Asimismo, desde la creación del Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental del INIA, en 2006, se han promovido las capacidades y los recursos del Laboratorio de Bioproducción, del Laboratorio de Microbiología de Suelos y de la Unidad de Biotecnología para conformar la Plataforma de Bioinsumos, cuyo objetivo es la generación de conocimiento sobre el microbioma y el desarrollo de productos y herramientas basados en microorganismos benéficos (Figura 4).

FIGURA 4. FUNCIONES DEL MICROBIOMA QUE ESTUDIA LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS PARA EL DESARROLLO DE PRODUCTOS



Fuente: *Elaboración propia.*

El principal objetivo de la plataforma es la identificación, la caracterización, la bioproducción y la formulación de cepas de microorganismos para su desarrollo comercial como bioinsumos agrícolas, con uso en la protección y nutrición vegetal (Altier *et al.*, 2020a). El conocimiento generado promueve tecnologías más amigables para el ambiente, que contribuyen a cumplir las exigencias de los mercados mundiales por alimentos de alta calidad, inocuos, y con uso restringido de agroquímicos. Asimismo, favorece intervenciones basadas en procesos biológicos que naturalmente ocurren en los agroecosistemas. Los desarrollos biotecnológicos obtenidos contribuyen a los programas de control biológico de insectos plaga y de enfermedades, así como a los programas de manejo nutricional de cultivos de interés agrícola y forestal.

Como antecedente, en el Uruguay se dispone de la tecnología para la elaboración de inoculantes de calidad sobre la base de rizobios, llevada adelante con éxito por el sector público y privado en forma conjunta. Desde 1960, el uso de inoculantes ha sido ampliamente adoptado por el sector productivo, con significativos beneficios económicos, ambientales y sociales (Altier *et al.*, 2013a, Beyhaut *et al.*, 2020a).

3. Estrategia de investigación en el desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos

La Plataforma de Bioinsumos del INIA trabaja en el marco del concepto de “una sola salud”, poniendo énfasis en el rol de los microorganismos en la disponibilidad de fósforo y nitrógeno para los cultivos y en el control biológico de plagas y enfermedades (Altier *et al.*, 2020a). La estrategia propuesta parte del reconocimiento de la diversidad y la multifuncionalidad presentes en el microbioma, investigando las características asociadas a la promoción del crecimiento vegetal. El desafío es identificar cepas de microorganismos con la función deseada que puedan ser utilizadas para desarrollar un producto tecnológico. Esto se logra a través de los procesos de bioproducción y formulación, con factibilidad para ser escaladas a nivel industrial con fines de comercialización (Figura 4). El uso de herramientas bioinformáticas y el abordaje de metagenómica microbiana complementan el análisis conjunto de información genómica, fenotípica y ambiental sobre las cepas de interés (Abreo y Altier, 2019).

¿Qué son bioinsumos microbianos? Los bioinsumos microbianos son productos de origen biológico, formulados con cepas de microorganismos con una identidad precisa, utilizados para mejorar la producción, la calidad y la salud de las plantas, o las características biológicas del suelo y el ambiente. Incluyen a los biofertilizantes y bioplaguicidas, encontrándose también denominaciones alternativas como inoculantes, biocontroladores, biopesticidas, biofungicidas y bioinsecticidas. Cabe destacar que muchas veces una misma cepa microbiana posee mecanismos múltiples que permiten explotar su capacidad para formularla como biofertilizante o bioplaguicida. A continuación, se presenta la definición de algunos términos.

Biofertilizante: bioinsumo elaborado sobre la base de una cepa de un microorganismo benéfico conocido que, al aplicarse al suelo o a las semillas, promueve el crecimiento vegetal o favorece el aprovechamiento de los nutrientes en asociación con la planta o su rizosfera. Incluye los *inoculantes* elaborados con rizobios, micorrizas y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

Bioplaguicida: bioinsumo elaborado a partir de una cepa de un microorganismo benéfico conocido que ejerce una acción de protección de la planta mediante la supresión de patógenos (*biofungicida*) o insectos plaga (*bioinsecticida*) por mecanismos directos (parasitismo, antibiosis, competencia) o indirectos (inducción de la resistencia sistémica vegetal).

Cepa microbiana: cultivo puro debidamente identificado, genotipado y caracterizado, al cual se le atribuye una acción biológica definida.

Formulación: proceso de preparación de la cepa microbiana con otros ingredientes o técnicas que garantizan la estabilidad y viabilidad del bioinsumo.

La estrategia de investigación en el desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos es un camino que se recorre paso a paso (Figura 5). La investigación y el desarrollo de un insumo basado en microorganismos implica un desafío a varios niveles. En el aspecto científico, deben responderse varias preguntas que abarcan cuestiones moleculares y ecológicas del microorganismo y conocimiento agronómico del sistema: ¿cómo actúa y en qué condiciones es capaz de expresar las características deseadas? ¿Es posible mejorar el desempeño de un microorganismo mediante cambios en las condiciones en que es producido? ¿Afectarán la formulación del producto la sobrevivencia y la actividad del microorganismo en el campo? ¿Es necesario modificar el manejo de los cultivos para hacerlos más receptivos a la nueva tecnología? ¿La nueva tecnología es segura?

Para responder estas preguntas, la estrategia de trabajo sigue una pauta de etapas sucesivas de *screening* (Altier *et al.*, 2020a, Glare *et al.*, 2012, Köhl *et al.*, 2011). Se aplica a la resolución de problemas identificados a partir de una demanda tecnológica del sector productivo o del gobierno. Se elabora una propuesta con los socios identificados, basada en el modelo de alianzas estratégicas público-privadas, el cual involucra actores del sector productivo, la industria, la academia, la cooperación internacional y la incorporación de estudiantes (Figura 6). El desarrollo de la investigación abarca diversas etapas, desde la prospección, la identificación, la evaluación de actividad biológica, hasta la selección y multiplicación de un microorganismo benéfico, formulado en condiciones que garanticen la estabilidad y la viabilidad del prototipo de producto (Altier *et al.*, 2020a).

FIGURA 5. ESTRATEGIA DE TRABAJO EN EL DESARROLLO DE UN BIOINSUMO



Fuente: Elaboración propia.

A partir del prototipo formulado a escala experimental, se inicia una etapa de generación de conocimiento sobre eficacia agronómica y análisis de toxicidad para la salud humana y ambiental, ambos requisitos necesarios para su registro. En general, en esta etapa adquiere más protagonismo el socio industrial, ya que determina las condiciones de producción a escala comercial y la formulación final a ser registrada. Cuando un bioinsumo se produce y formula a escala comercial como biofertilizante, bioinsecticida o biofungicida, debe ser registrado ante la autoridad competente, la cual debe asegurar las pautas de identidad, eficacia agronómica, seguridad para el ambiente y la salud humana, y el control de calidad. Se entiende por control de calidad el conjunto de acciones destinadas a garantizar la producción uniforme de lotes que cumplan, entre otros, los parámetros de identidad, actividad y pureza establecidos (Altier *et al.*, 2020a, Beyhaut *et al.*, 2020a). En Uruguay, la autoridad competente es la Dirección General de Servicios Agrícolas del MGAP.

FIGURA 6. LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS PROMUEVE UN MODELO DE ALIANZAS CON SOCIOS ESTRATÉGICOS

Socios & alianzas estratégicas

Modelo de alianzas: sector productivo, industria, academia, cooperación internacional



Fuente: Elaboración propia.

La transferencia al sistema productivo y la adopción de la tecnología están condicionadas a un fuerte compromiso de políticas de Estado para la armonización del marco normativo y la instrumentación de acciones de promoción y extensión para el uso de bioinsumos. La ejecución de

FPTA 344 DIGEGRA/MGAP/FAGRO “Producción e introducción de agentes de Control Biológico en el manejo regional integrado de insectos y enfermedades de hortalizas” es un ejemplo de plataforma de validación a tales efectos, que promueve roles activos y coordinados del sector público, el sector industrial y el sector productivo (Campelo *et al.*, 2019).

3.1. Colección de cepas microbianas de la Plataforma de Bioinsumos del INIA

Los microorganismos que tienen el potencial para desarrollarse como un bioinsumo y otros microorganismos de interés se encuentran conservados en la Colección INIA de Recursos Genéticos Microbianos de la Plataforma de Bioinsumos (Tabla 1). La colección cuenta con cepas de hongos (ILB) y bacterias (ILBB) para el control biológico de enfermedades e insectos, la promoción del crecimiento vegetal y la nutrición de cultivos, así como con aislamientos de patógenos vegetales. Las cepas son caracterizadas a nivel molecular y bioquímico y evaluadas por su funcionalidad. Además, se destaca especialmente que el INIA realiza la curaduría de la Colección Nacional de Cepas de Rizobios (CNCR) de Uruguay: anualmente, se entregan a la industria las cepas de rizobios con las que se producen los inoculantes comerciales de leguminosas forrajeras y de soja (Barlocco *et al.*, 2014, 2015; Beyhaut *et al.*, 2020a).

TABLA 1. COLECCIÓN DE RECURSOS GENÉTICOS MICROBIANOS DE LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS DEL INIA, CARACTERIZADOS POR FUNCIÓN PRINCIPAL DE INTERÉS

GRUPO	FUNCIÓN	GÉNERO	REFERENCIA
Hongos	Control biológico Promoción de crecimiento	<i>Lecanicillium</i> <i>Beauveria</i> <i>Metarhizium</i> <i>Isaria</i> <i>Trichoderma</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2019 Corallo <i>et al.</i> , 2019 Rivas <i>et al.</i> , 2014
Bacterias	Control biológico Promoción de crecimiento	<i>Bacillus</i> <i>Serratia</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Streptomyces</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2018 Abreo <i>et al.</i> , 2021 Altier <i>et al.</i> , 2013
Bacterias	Solubilización y mineralización de fósforo Promoción de crecimiento	<i>Bacillus</i> <i>Streptomyces</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Rizobios</i>	Barlocco <i>et al.</i> , 2015 Cerecetto, 2018 Martin, 2019

(Continúa en página siguiente)

Bacterias	Fijación de nitrógeno (CNCR)*	<i>Rhizobium</i> <i>Bradyrhizobium</i> <i>Mesorhizobium</i> <i>Sinorhizobium</i>	Barlocco <i>et al.</i> , 2014 Beyhaut <i>et al.</i> , 2020a
Hongos y Oomycota	Fitopatógeno	<i>Pythium</i> <i>Claviceps</i> <i>Fusarium</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2017 Oberti <i>et al.</i> , 2020

*CNCR: Colección Nacional de Cepas de Rizobios (Uruguay).

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Programa activo de selección de cepas de elite

La caracterización de las cepas que conforman las colecciones ha permitido identificar aquellas con actividad biológica destacada y habilidad industrial para ser escaladas a nivel experimental, mediante la optimización del proceso de producción microbiana. Estas cepas conforman la colección de *elite* y han sido avanzadas a la etapa de caracterización genómica y formulación de un prototipo experimental (Tabla 2).

TABLA 2. CEPAS DE *ELITE* DE LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS DEL INIA

Cepa*	Especie	Enfermedad/plaga que controla/función	Cultivo objetivo	Grado de desarrollo
ILB 205 ¹	<i>Beauveria bassiana</i>	Chinche del <i>Eucalyptus</i>	Eucalyptus	Formulación nivel prototipo
ILBB 145 ²	<i>Serratia ureilytica</i>	Damping-off de tomate producido por <i>Pythium cryptoirregulare</i>	Tomate (almácigo)	Formulación pendiente
ILBB 210 ³	<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i>	<i>Argyrotaenia sphaleropa</i>	Manzano	Formulación pendiente
ILB 255 (= ILB 3) ⁴	<i>Lecanicillium muscarium</i>	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	Tomate	Formulación pendiente
ILB 256 (= IILB 9) ⁴	<i>Lecanicillium longisporum</i>	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	Tomate	Formulación pendiente
ILBB 5925, ⁵	<i>Bacillus megaterium</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro
ILBB 95 ⁶	<i>Bacillus aryabhatai</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro

(Continúa en página siguiente)

ILBB 44 ⁶	<i>Bacillus pumilus</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro
----------------------	-------------------------	--	------	---

Referencias: ^{*1} Abreo et al., 2019; ² Abreo et al., 2021; ³ Abreo et al., 2018; ⁴ Rivas et al., 2014, ⁵ Cerecetto, 2018; ⁶ Martin, 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Entre las líneas de investigación de la plataforma, se ha priorizado la generación de conocimiento sobre: 1) la óptima expresión agronómica de la fijación biológica de nitrógeno en soja y otras leguminosas, mediante la simbiosis con cepas selectas de rizobios (Altier *et al.*, 2013; Beyhaut *et al.*, 2020a, 2020b, Cerecetto *et al.*, 2021); 2) el desarrollo de biofertilizantes basados en microorganismos que aumentan la fitodisponibilidad de fósforo (George *et al.*, 2018; Altier *et al.*, 2020b; Torres *et al.*, 2020); 3) el desarrollo de biofungicidas y bioinsecticidas para el control biológico de enfermedades e insectos plaga, a partir de cepas con capacidad de antagonismo y promoción del crecimiento vegetal (Rivas *et al.*, 2014, 2019, 2020; Abreo *et al.*, 2018, 2019, 2021, Corallo *et al.*, 2019). Asimismo, se ha generado conocimiento sobre las prácticas culturales que moldean el microbioma edáfico (Vaz *et al.*, 2018; Villar *et al.*, 2019; Garaycochea *et al.*, 2020).

4. Principales contribuciones del manejo del microbioma y los bioinsumos a las transiciones agroecológicas

El conocimiento y manejo del microbioma resulta esencial en el abordaje de transiciones agroecológicas. Contribuye directamente a la gestión de los recursos naturales y a la reducción del impacto ambiental. La gran variedad de funciones que cumplen los microorganismos favorece la salud del suelo y del sistema productivo. Dentro de las funciones mediadas por los microorganismos, la Plataforma de Bioinsumos del INIA ha puesto énfasis en la nutrición vegetal (nitrógeno y fósforo) y el control biológico de enfermedades y plagas, considerando las características asociadas a la promoción del crecimiento vegetal.

Sobre esta base, las tecnologías asociadas al desarrollo y uso de bioinsumos promueven las funciones ecosistémicas, mejoran la calidad del suelo, y reducen –al menos parcialmente– las aplicaciones de agroquí-

micos. Se proponen optimizar los procesos de escalado y formulación de productos microbianos, contribuyendo al concepto de “semillas inteligentes”, asociado a la genética INIA. Esto permite: 1) mantener la fijación biológica de nitrógeno (FBN) como principal fuente de nitrógeno en los sistemas de producción, de acuerdo con la política pública establecida; 2) disminuir la dependencia de fertilizantes fosfatados y reducir costos e impacto ambiental, atendiendo especialmente la calidad de los cursos de agua; 3) contribuir al manejo integrado mediante el control biológico de plagas y la promoción de crecimiento vegetal, disminuyendo la dependencia de agroquímicos y aumentando el valor del producto; 4) integrar la metagenómica microbiana y las herramientas bioinformáticas para el análisis conjunto de información genómica, fenotípica y ambiental.

En la Plataforma de Bioinsumos del INIA se han desarrollado capacidades de infraestructura y recursos humanos calificados. Se dispone de una colección de cepas caracterizadas y de *elite* que representan una base sólida desde la cual continuar investigando para responder a las demandas del sector productivo. A su vez, el establecimiento de alianzas estratégicas entre el sector público y privado, la academia y la cooperación internacional son clave para el desarrollo industrial y la innovación en bioinsumos de uso agrícola.

Teniendo en cuenta el modelo de la tecnología de inoculantes basados en rizobios que se implementó con éxito desde hace varias décadas en el Uruguay, se debe continuar con la promoción de una estrategia nacional en torno de normativas de registro y control de calidad de insumos biológicos, y de la protección de la propiedad intelectual. Debido a sus características particulares, se requiere también de políticas específicas de promoción y extensión dirigidas a fomentar su adopción exitosa.

Las tecnologías derivadas del manejo del microbioma y los bioinsumos han realizado contribuciones históricas en los sistemas productivos (por ejemplo, los inoculantes rizobianos para leguminosas y el control biológico como estrategia para el manejo integrado de plagas). En la actualidad, son temas de agenda ineludibles para una producción agropecuaria sostenible que promueva transiciones agroecológicas, contribuyendo a la mejora de la calidad, la inocuidad y la diversificación de productos y procesos (INIA, 2017). El INIA, mediante su plan estratégico con visión de largo plazo, puede jugar un rol esencial en la generación de conocimiento y tecnologías para la producción agroecológica, basando sus acciones en el enfoque de una sola salud.

Referencias

Abreo, E. y Altier, N.

(2019), “Pangenome of *Serratia marcescens* strains from nosocomial and environmental origins reveals different populations and the links between them”, en *Sci Rep.*, 9, p.46. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-37118-0>>.

Abreo, E., Simeto, S., Corallo, B., Martínez, G., Lupo, S. y Altier, N.

(2019), “Dual selection of *Beauveria bassiana* strains and complex substrate media for the massive production of submerged spores with activity against the eucalyptus bronze bug *Thaumastocoris peregrinus*”, en *Biocontrol Sci Technol.*, 29(6), pp. 533-546.

Abreo, E., Valle, D., González, A. y Altier, N.

(2021), “Control of damping-off in tomato seedlings exerted by *Serratia* spp. strains and identification of inhibitory bacterial volatiles in vitro”, en *Syst Appl Microbiol.*, 44(2). DOI: 10.1016/j.syapm.2020.126177.

Abreo, E., Valle, D., Mujica, V. y Altier, N.

(2018), “Pathogenicity and virulence factors of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Bacillus* spp. towards *Argyrotaenia sphaleropa* larvae (Lepidoptera)”, en *J. Appl. Entomol.*, 142(9), pp. 882-892.

Abreo, E., Vaz-Jauri, P., Nuñez, L. et al.

(2017), “Pathogenicity of *Pythium* spp. obtained from agricultural soils and symptomatic legume seedlings in Uruguay”, en *Australasian Plant Dis. Notes.*, 12, p. 35. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s13314-017-0258-1>>.

Aktar, M. W., Sengupta, D. y Chowdhury, A.

(2009), “Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards”, en *Interdiscip Toxicol.*, 2(1), pp. 1-12.

Allegrí, M. (ed.)

(2014), *Un siglo de investigación agropecuaria 1914-2014: INIA de cara al futuro*, INIA, Montevideo, 370 pp.

Altier, N. y Abreo, E.

(2020), “One health: considerations in the International Year of Plant Health”, en *Agrociencia Uruguay*, 24(NE2), p. 422. Disponible en: <<http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/422>> [Consulta: 12 de mayo de 2021].

Altier, N., Abreo, E., Beyhaut, E., Rivas, F., Barlocco, C., Garaycochea, S., Dini, B., López, V., Mattos, N. y Mortalena, M.

(2020a), “Plataforma de Bioinsumos de uso agrícola: desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 85-90.

Altier, N., Abreo, E., Beyhaut, E., Garaycochea, S., Torres, P., Cerecetto, V., Martín, N., Cuitiño, M. J., Crispo, M., Arévalo, A. P., Rego, N., Arrospide, G., Lage, M. y Sundberg, G.

(2020b), “Desarrollo de un biofertilizante microbiano para aumentar la disponibilidad de fósforo en el cultivo de soja”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 95-100.

Altier, N., Beyhaut, E. y Pérez, C.

(2013a), “Root nodule and rhizosphere bacteria for forage legume growth promotion and disease management”, en Maheshwari, D. K., Saraf, M. y Aeron, A. (eds.), *Bacteria in agrobiology: crop productivity*, Springer, Dordrecht (Países Bajos), pp.167-184.

Altier, N., France, A., Correa de Mello, S., Peticari, A. y Rodríguez, P.

(2013b), *Documento Base: Recursos Microbianos*, Procisur, IICA, 35 pp. Disponible en: <http://www.procisur.org.uy/adjuntos/procisur_libro-microbianos_e3b.pdf>.

American Phytopathological Society (APS)

(2020), *International Year of Plant Health, IYPH 2020* Disponible en: <<https://www.apsnet.org/members/engagement/IYPH2020/Pages/default.aspx>> [Consulta: 22 de julio de 2022].

Barlocco, C., Cerecetto, V., Mattos, N., Mortalena, M., Mayans, M., Beyhaut, E. y Altier, N.

(2015), *Caracterización de la colección nacional de cepas de rizobios: multifuncionalidad*, Serie Actividades de Difusión, INIA, 755, pp. 4-7.

Barlocco, C., Mayans, M., Mattos, N., Altier, N. y Beyhaut, E.

(2014), “Colección nacional de cepas de rizobios en Uruguay: caracterización y puesta en valor”, en *Boletín FELACC*, 14, pp. 6-12. Disponible en: <<http://felacc.cinvestav.mx/boletin/14.pdf>>.

Berg, G.

(2009), “Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture”, en *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 84, pp. 11-18.

Beyhaut, E., Barlocco, C., Mortalena, M., Mattos, N., López, V. y Altier, N.

(2020a), “Convenio INIA-MGAP: sistema de control de calidad de inoculantes”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 91-93.

Beyhaut, E., Abreo, E., Vaz, P., Pérez, C. y Altier, N.

(2020b), “Prácticas agronómicas centrales en la implantación de soja: inoculación y uso de curasemillas”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 101-102.

Brühl, C. A. y Zaller, J. G.

(2019), “Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides”, en *Front Environ Sci*, 7, p. 177. Disponible en: <<https://bit.ly/3erLf56.47>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Campelo, E., Banchemo, L., Vieta, A., Godín, A., Iurato, A., Peirano, Z., Curbelo, Y., Galván, G., Bao, L., González, P. y Fasiolo, C.

(2019), “Control biológico de plagas y enfermedades en horticultura”, en *Revista INIA Uruguay*, 56, pp. 84-87.

Cea, J.

(2006), “Update on worldwide regulations for mycotoxins. The Mercosur harmonization of limits on mycotoxins with the international regulations”, en *Revista LATU INNOTEC*, 1.

Cerectto, V.

(2018), *Evaluación de bacterias pertenecientes a colecciones nacionales por su capacidad de actuar sobre la fitodisponibilidad del fósforo: selección, mecanismos involucrados y potencial uso como biofertilizante en plantas de soja (Glycine max)*, Tesis de maestría en biotecnología, UDELAR, Montevideo.

Cerectto, V., Beyhaut, E., Amenc, L., Trives, C., Altier, N. y Drevon, J.-J.

(2021), “Contrasting Expression of Rhizobial Phytase in Nodules of Two Soybean Cultivars Grown Under Low Phosphorus Availability”, en *Front Sustain Food Syst.*, 4, 607678. doi: 10.3389/fsufs.2020.607678.

Corallo, B., Simeto, S., Martínez, G., Gómez, D., Abreo, E., Altier, N. y Lupo, S.

(2019), “Entomopathogenic fungi naturally infecting the eucalypt bronze bug, *Thaumastocoris peregrinus* (Heteroptera: Thaumastocoridae), in Uruguay”, en *J. Appl. Entomol.*, 143(5), pp. 542-255.

Deguine, J. P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., Aubertot, J. N. (eds.)

(2017), *Agroecological Crop Protection*, Springer, Versailles, 249 pp.

Ehler, L. E.

(2006), “Integrated pest management (IPM) definition, historical development and implementation, and the other IPM”, en *Pest. Manag. Sci.*, 62, pp. 787-789.

FAO

(2011), *One Health: Food and Agriculture Organization of the United Nations Strategic Action Plan* [Internet], Roma. Disponible en: <<https://bit.ly/3laxhqR>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

FAO

(2017), Plant health and food security [Internet], IPPC Disponible en: <<http://www.fao.org/3/i7829e/i7829e.pdf>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

FAO

(2018), *Agricultura sostenible y biodiversidad: un vínculo indisociable* [Internet]. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/i6602s/i6602s.pdf>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Garaycochea, S., Romero, H., Beyhaut, E., Andrew, L. y Altier, N.

(2020), “Soil structure, nutrient status and water holding capacity shape uruguayan grassland prokaryotic communities”, en *FEMS Microbiol Ecol.*, 96(12):faa207. Disponible en: <<https://doi.org/10.1093/femsec/faa207>>.

Garbeva, P., Van Veen, J. A. y Van Elsas, J. D.

(2004), "Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness", en *Annu. Rev. Phytopathol.*, 42, pp. 243-270.

George, T. S., Giles, C. D., Menezes-Blackburn, D. et al.

(2018), "Organic phosphorus in the terrestrial environment: a perspective on the state of the art and future priorities", en *Plant Soil*, 427, pp. 191-208.

Glare, T., Caradus, J., Gelernter, W., Jackson, T., Keyhani, N., Kohl, J., Marrone, P., Morin, L. y Stewart, A.

(2012), "Have biopesticides come of age?", en *Trends Biotechnol.*, 30, pp. 250-258.

INIA

(2017), Plan Estratégico INIA 2016-2020 Visión 2030, *Temas Institucionales*, 15, 60 pp.

Kinkel, L. L., Bakker, M. G. y Schlatter, D. C.

(2011), "A coevolutionary framework for managing disease suppressive soils", en *Annu. Rev. Phytopathol.*, 49, pp. 47-67.

Köhl, J., Postma, J., Nicot, P., Ruocco, M. y Blum, B.

(2011), "Stepwise screening of microorganisms for commercial use in biological control of plant pathogenic fungi and bacteria", en *Biol Control*, 57, pp. 1-12.

Lal, R.

(2018), "Sustainable Development Goals and the International Union of Soil Sciences", en Lal, R., Horn, R. y Kosaki, T. (eds.), *Soil and Sustainable Development Goals*, Catena, Stuttgart, pp. 189-196.

Leach, J. E., Triplett, L. R., Argueso, C. T. y Trivedi, P.

(2017), "Communication in the Phytobiome", en *Cell*, 169(4), pp. 587-596.

Le Gall, M., Overson, R., y Cease, A.

(2019), "A Global Review on Locusts (Orthoptera: Acrididae) and Their Interactions with Livestock Grazing Practices", en *Front Ecol Evol*, 7, p. 263 [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3oVWnff>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Martin, N.

(2019), *Prospección, caracterización y bioproducción de Bacillus sensu lato movilizadores de fósforo del suelo*, Tesis de maestría en biotecnología, UDELAR, Montevideo.

Mondino, P., Altier, N., Vero, S., Pereyra, S. y Folch, C.

(2014), "Control biológico de enfermedades de plantas en Uruguay", en Bettiol, W., Rivera, M., Mondino, P., Montealegre, J. y Colmenárez, Y. (eds.), *Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe*, Facultad de Agronomía, Montevideo, pp. 339-368.

Oberti, H., Dalla Rizza, M., Reyno, R., Murchio, S., Altier, N. y Abreo, E.

(2020), "Diversity of *Claviceps paspali* reveals unknown lineages and unique alkaloid genotypes", en *Mycologia.*, 112(2), pp. 230-243. DOI: 10.1080/00275514.2019.1694827. Disponible en: <<https://www.tandfonline.com/toc/umyc20/current>>.

Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE)

(2020), *One Health “at a glance”* [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3e01cJk>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Pérez-Parada, A., Goyenola, G., Teixeira de Mello, F. y Heinzen, H.

(2018), “Recent advances and open questions around pesticide dynamics and effects on freshwater fishes”, en *Curr Opin Environ Sci Health*, 4, pp. 38-44.

Queenan, K., Garnier, J., Nielsen, L. R., Buttigieg, S., De Meneghi, D., Holmberg, M., Zinsstag, J., Rüegg, S., Häsler, B. y Kock, R.

“Roadmap to a One Health Agenda 2030”, en *CAB Reviews*, 12, p. 14 [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/32iyHId>>.

Radcliffe, E. B., Hutchinson, W. D. y Cancelado, R. E. (eds.)

(2009), *Integrated pest management: concepts, tactics, strategies and case studies*, Cambridge University Press, Cambridge, 529 pp.

Reddy, K. R. N., Salleh, B., Saad, B., Abbas, H. K., Abel, C. A. y Shier, W. T.

(2010), “An overview of mycotoxin contamination in foods and its implications for human health”, en *Toxin Rev*, 29(1), pp. 3-26.

Rivas, F., Nuñez, P., Jackson, T. y Altier, N.

(2014), “Effect of temperature and water activity on mycelia radial growth, conidial production and germination of *Lecanicillium* spp. isolates and their virulence against *Trialeurodes vaporariorum* on tomato plants”, en *BioControl*, 59, pp. 99-109.

Rivas, F., Hampton, J. G., Altier, N., Swaminathan, J., Rostás, M., Wessman, P., Saville, D. J., Jackson, T. A., Jackson, M. A. y Glare, T. R.

(2020), “Production of Microsclerotia From Entomopathogenic Fungi and Use in Maize Seed Coating as Delivery for Biocontrol Against *Fusarium graminearum*”, en *Front Sustain Food Syst*, 4:606828. doi: 10.3389/fsu-2020.606828.

Rivas-Franco, F., Hampton, J., Morán-Diez, M., Narciso, J., Rostás, M., Wessman, P., Jackson, T. y Glare, T.

(2019), “Effect of coating maize seed with entomopathogenic fungi on plant growth and resistance against *Fusarium graminearum* and *Costelytra giveni*”, en *Biocontrol Sci Technol*, 29(9), pp. 877-900.

Schumann, G. L. y D’Arcy, C. J.

(2017), “The Irish Potato Famine: the birth of plant pathology”, en Schumann, G. L. y D’Arcy, C. J. (eds.), *Hungry planet: stories of plant diseases*, APS Press, St. Paul (MN), pp. 1-19.

Stenberg, J. A., Sundh, I., Becher, P. G. et al.

(2021), “When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications”, en *J Pest Sci*, 94, pp. 665-676. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10340-021-01354-7>>.

Thompson, R. C. A.

(2013), “Parasite zoonoses and wildlife: one health, spillover and human activity”, en *Int. J. Parasitol.*, 43(12), pp. 1079-1088.

Torres, P., Beyhaut, E., Abreo, E., Cuitiño, M. J., Ceretta, S., Arrospide, G. y Altier, N.

(2020), “Semillas inteligentes: genética vegetal y genética microbiana se combinan para mejorar la eficiencia de la fertilización fosfatada en soja y reducir el impacto ambiental”, en *Revista INIA Uruguay*, 63, pp. 63-67.

Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K. y Leach, J. E.

(2021), “Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes”, en *New Phytol*, 230, pp. 2129-2147. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/nph.17319>>.

United Nations Development Programme (PNUD)

(2015), *Sustainable Development Goals* [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3erjVDO>>.

Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., Van Straalen, N. M.

(2008), “The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems”, en *Ecol. Letts.*, 11, p. 651.

Vaz Jauri, P., Altier, N., Pérez, C. A. y Kinkel, L.

(2018), “Cropping history effects on pathogen suppressive and signaling dynamics in *Streptomyces* communities”, en *Phytobiomes*, 2(1), pp. 14-23. Disponible en: <<https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-17-0024-R>>.

Villar, A., Ernst, O., Cadenazzi, M., Vero, S., Pereyra, S., Altier, N., Chouhy, D., Langone, F. y Pérez, C.

(2019), “Crop Sequence Effects on Native Populations of *Trichoderma* spp. in No-till Agriculture”, en *Agrociencia Uruguay*, 23(1):e55 [Internet]. Disponible en: <<http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/55>>.