

Benefic organisms in agricultural crops: Towards a safety and healthy food in response to COVID-19 and future syndemics

Organismos benéficos en cultivos agrícolas: Hacia una producción de alimentos sanos e inocuos en respuesta a COVID-19 y futuras sindemias

José Alfredo Samaniego-Gaxiola, Campo Experimental La Laguna, INIFAP. Blvd. Prof. José Santos Valdez # 1200 Pte. Colonia Centro. Matamoros, Coahuila. C.P. 27440. Corresponding author: samaniego.jose@inifap.gob.mx; jasg58@gmail.com.

Received: February 25, 2021.

Accepted: April 29, 2021.

Samaniego-Gaxiola JA. 2021. Benefic organisms in agricultural crops: Towards a safety and healthy food in response to COVID-19 and future syndemics. *Mexican Journal of Phytopathology* 39(4): 261-281.

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2021-13>

Abstract. A population with an adequate immunity is key to reduce the effects of COVID-19. Moreover, a healthy diet and an innocuous environment are factors for an adequate immunity. Healthier and more innocuous foods could be obtained with the extensive use of beneficial organisms on agricultural crops, helping reduce the use of agrochemicals and increasing the tolerance of plants to stress caused by abiotic and biotic factors. Nitrogen-fixating bacteria or free-living bacteria, mycorrhizae, endosymbiotic microorganisms, endophytes, entomopathogenic fungi and bacteria, pest predators and parasitoids,

Resumen. Una población con buena inmunidad es clave para atenuar los efectos de COVID-19. A su vez, la alimentación sana y un ambiente inocuo son factores para una buena inmunidad. Alimentos más sanos e inocuos se podrían alcanzar con el uso extensivo de organismos benéficos en cultivos agrícolas permitiendo la reducción de agroquímicos e incrementando la tolerancia de plantas al estrés por factores abióticos y bióticos. Bacterias fijadoras de nitrógeno o de vida libre, micorrizas, microorganismos endosimbióticos, endófitos, hongos y bacterias entomopatógenas, depredadores y parasitoides de plagas, virus hiperparásitos de plagas y patógenos, son algunos de los organismos que pueden inducir la supresión natural de parásitos, fijar nitrógeno y optimizar la captura de nutrientes y agua, entre otros beneficios ecosistémicos. En esta revisión se exponen funciones y propiedades de organismos benéficos y se plantean propuestas para su aprovechamiento en beneficio de agricultores y consumidores.

hyper parasitic viruses of pests and pathogens are some of the organisms that can induce the natural suppression of parasites, fixate nitrogen and optimize the capture of nutrients and water, among other ecosystemic benefits. This revision presents functions and properties of beneficial organisms and proposals are made for their use to benefit farmers and consumers, with the intention of contributing to the productive processes towards a sustainable agriculture.

Key words. Biological control, endophytes, sustainable agriculture, SARS-CoV-2

INTRODUCTION

COVID-19, more than a pandemic, has been considered a syndemic or an infectious disease that interacts with biological, social and behavioral factors. In this way, understanding the effect of SARS-CoV-2 (Martín-Moreno *et al.*, 2021), the virus that causes the disease, clinically or epidemiologically, would require the interaction with non-transmissible chronic diseases, comorbidities, malnutrition, pollution, demography, urbanism, etc., which are a product, in many cases, of socioeconomic inequalities (Horton, 2020), but also of human recklessness. In 2020, during the first and second pandemic cycles, an attempt was perceived to acknowledge the backwardness of government health systems, even in developed nations, as well as the importance of reducing socioeconomic inequalities and strengthening preventive medicine (González-Salgado *et al.*, 2021; Martín-Moreno *et al.*, 2021). The World Health Organization (WHO) itself was criticized for its slow responses and the bureaucratization of its international management processes. Currently, at the end of this edition, mitigation efforts seem

Con lo anterior, se estaría contribuyendo a mejorar los procesos productivos hacia una agricultura sustentable.

Palabras clave. Control biológico, endófitos, agricultura sustentable, SARS-CoV-2

INTRODUCCIÓN

La enfermedad COVID-19, más que una pandemia, se ha considerado una sindemia o enfermedad infecciosa que tiene interacción con factores biológicos, sociales y conductuales. Así, comprender clínica y epidemiológicamente el efecto de SARS-CoV-2 (Martín-Moreno *et al.*, 2021), el virus causante, tendría que incluir la interacción con enfermedades crónicas no transmisibles, comorbilidades, desnutrición, contaminación, insalubridad, demografía, urbanismo, etc. que son producto, en muchos casos, de desigualdades socioeconómicas (Horton, 2020), pero también de la insensatez humana. En 2020, durante el primer y segundo ciclo pandémico se percibió un intento por reconocer los rezagos de sistemas de salud gubernamentales, incluso de países desarrollados, y la importancia de atenuar las desigualdades socioeconómicas y fortalecer la medicina preventiva (González-Salgado *et al.*, 2021; Martín-Moreno *et al.*, 2021). Incluso la misma OMS fue criticada por su lenta capacidad de reacción y burocratización de sus procesos de gestión internacional. En la actualidad, al cierre de la edición, los esfuerzos de mitigación parecen centrarse en los enfoques clínicos clásicos y en el impulso de programas de vacunación extensivos y globales con una fuerte preeminencia de la industria farmacéutica por lo que la prevención, como modelo sistémico de salud, parece relegado a intereses económicos (Nota del Editor).

to center on the classic clinical approaches and the promotion of extensive and global vaccination programs with a strong preeminence of the pharmaceutical industry, therefore prevention, as a systemic health model, seems reduced to economic interests (Editor's note).

However, farming activities in Mexico, from a Phytopathological point of view, propose the confrontation of COVID-19 and subsequent pandemics in a better way. One feasible vision is the use of microorganisms that benefit plants, to improve the efficiency of fertilizers, pest and disease management, and other crop stress factors. The use of microorganisms may help reduce the application of agrochemicals and increase tolerance to abiotic and biotic stress, which would increase the yield and the quality of agricultural products, reducing direct costs related to production and the environment. This approach would translate into better food for the human population, which could improve its response to non-infectious, infectious and degenerative diseases as a result of a strengthened immune system, as well as a higher quality of life, in general. The aim of this revision is to describe a sustainable approach to our agriculture, in which natural biological mechanisms gradually integrate into contemporary agriculture. We therefore suggest reinforcing the links between the sectors related to agriculture and defining priority research topics. This could help improve our pest and disease management systems, water use, pertinence of fertilizers and an adaptation to climate change, translating into sustainable agriculture.

Complex biological systems

In nature, all living organisms are complex systems. For example, a walnut tree (*Carya illinoensis*) that covers a surface of 100 m² (10

Sin embargo, desde la actividad agropecuaria en México y en el mundo se propone afrontar COVID-19 y subsecuentes pandemias de mejor manera. Una visión viable es el empleo de microorganismos benéficos para las plantas, que mejoren la eficiencia de fertilizantes, el manejo de plagas y enfermedades, y otros factores de estrés para cultivos. El uso de microorganismos puede ayudar a disminuir la aplicación de agroquímicos e incrementar la tolerancia al estrés abiótico y biótico, lo que incrementaría el rendimiento y calidad de los productos agrícolas disminuyendo costos directos asociados a la producción y al ambiente. Este enfoque redundaría en mejores alimentos a la población humana quienes podrían mejorar su respuesta a enfermedades no infecciosas, infecciosas y degenerativas como consecuencia de un sistema inmune fortalecido y mejor calidad de vida en general. El objetivo de esta revisión es describir un enfoque sostenible de nuestra agricultura, donde los mecanismos biológicos naturales se vayan integrando gradualmente a la agricultura contemporánea. Para ello, se sugiere reforzar la vinculación entre los sectores relacionados con la agricultura y definir temas prioritarios de investigación. Esto podría conducir a mejorar nuestros sistemas de manejo de plagas y enfermedades, uso del agua, pertinencia de fertilizantes y una adaptación al cambio climático, redundando en una agricultura sostenible.

Los sistemas biológicos complejos

En la naturaleza, todos los organismos vivos son sistemas complejos. Por ejemplo, un nogal (*Carya illinoensis*) que ocupa una superficie de 100 m² (10 x10 m) puede albergar tres mil o más especies, tomando en cuenta la diversidad de microorganismos del suelo, aquellos que viven en las ramas, el follaje, el tronco y las raíces del árbol, sobre y dentro de las malezas e insectos plaga o

x10 m) can harbor three thousand species or more, considering the diversity of microorganisms in the soil, those which live in the branches, foliage, the trunk and roots of the tree, on and inside the weeds and pest or beneficial insects. The *holobiont* and the *hologenome* are two terms that tell of the set of organisms and genes that make up an individual, respectively, which in turn is part of a population with a defined structure and function. Plants, animals and insects are hosts of many species of microorganisms with their respective genomes (*holobionts/hologenomes*). Thousands of microbial species, by the billions, live inside humans. Thus, other attributes of the complexity of biological systems are the communication between its elements (organisms-soil-atmosphere), where each one has a bearing on the others, they receive feedback and their responses are non-linear. In addition, no element has the total of information on the system. The system can change dramatically due to the effect of one or a few elements. Systems are open, meaning that they communicate with other systems that surround them and their evolutionary history determines their ability to adapt. Biological systems transform into agricultural systems, using large amounts of energy. Oftentimes, agriculture destroys ecosystems, pollutes soils and bodies of water, leading to 'unproductive lands'. The concept of 'unproductive' contains the anthropogenic element of 'profitability'; if it is not satisfied: a) the crop is changed, b) land use is changed, or c) the land, of agricultural use, is neglected. Approximately 2 million km² of agricultural lands have been neglected in recent decades (Mata-González, 2020).

The nature of plant-microorganism associations

Symbiotic associations between plants, insects and microorganisms have been allowed to exist for

benéficos. El *holobionte* y el *hologenoma* son dos términos que advierten el conjunto de organismos y genes que conforman un individuo, respectivamente, que a su vez es parte constitutiva de una población con una estructura y función definida. Las plantas, los animales y los insectos son hospederos de múltiples especies de microorganismos con sus respectivos genomas (*holobiontes/holgenomas*). Miles de especies microbianas, en miles de millones, viven dentro de los humanos. Así, otros atributos de la complejidad de los sistemas biológicos, son la comunicación entre sus elementos (organismos-suelo-atmósfera), donde unos inciden sobre otros, reciben retroalimentación y sus respuestas no son lineales. Además, ningún elemento tiene la información del sistema en su totalidad. El sistema puede cambiar dramáticamente por efecto de uno o pocos elementos. Los sistemas son abiertos, es decir, se comunican con otros sistemas que los rodean y su historia evolutiva determina su capacidad para adaptarse. Los sistemas biológicos se transforman a sistemas agrícolas, utilizando grandes cantidades de energía. A menudo, la agricultura destruye ecosistemas, contamina el suelo y cuerpos de agua, lo que provoca 'tierras improductivas'. El concepto de 'improductivo' tiene el elemento antropogénico de 'rentabilidad'; si no es satisfecho: a) se cambia de cultivo, b) se cambia el uso de la tierra, o c) se abandona ese suelo de la actividad agrícola. Aproximadamente 2 millones de km² de tierras agrícolas se han abandonado en las últimas décadas (Mata-González, 2020).

La naturaleza de las asociaciones planta-microorganismos

Las asociaciones simbióticas entre plantas, insectos y microorganismos les ha permitido coexistir en los últimos 400 millones de años (Poveda-Arias, 2019). Entre las interacciones microorganismos-

the past 400 million years (Poveda-Arias, 2019). Some of the microorganism-plant interactions worth highlighting are endophytic microorganisms, which live inside plants without causing any harm to them; other microorganisms can live in the rhizosphere (soil around the root), rhizoplane (on the root) and the phyllosphere (on the leaf) (Sharma *et al.*, 2019). Nitrogen-fixating symbiotic bacteria or free-living bacteria and mycorrhizal fungi can also be found. These organisms are usually limited by the management of agricultural crops, such as with the excess use of nitrogen, phosphorous and potassium in the soil, the immoderate use of pesticides, the type of tillage, monoculture and crop rotations (Guerra-Sierra, 2008). The high use of synthetic inputs in contemporary agriculture can lead to high yields in crops, but it generally undermines the benefit of organisms that interact with plants. By contrast, natural systems do the opposite. Both the natural systems and organic agroecosystems are more durable and sustainable than the intensive agriculture farming systems. The fragility of the ecosystems has been widely documented. For example, in areas in which certain nitrogen sources contaminate the soil and air, the growth of lichen species is limited, which are the diet of two endangered primate species (Wang *et al.*, 2020).

Bacteria-insect interactions

Inside insects, microorganisms such as bacteria, fungi, nematodes, phytoplasmas and viruses live inter or intracellularly; most of these are beneficial or not harmful, although some are pathogenic or parasitic. The bacteria *Wolbachia* are widely distributed in arthropods and nematodes and can kill and influence the reproduction of agricultural pest insects and vector insects for human and animal diseases (Rodríguez, 2013).

planta destacan los microorganismos endófitos, quienes viven dentro de las plantas sin dañarlas, otros microorganismos pueden vivir en la rizósfera (suelo aledaño a la raíz), rizoplane (sobre la raíz) y la filósfera (sobre la hoja) (Sharma *et al.*, 2019). También se pueden encontrar bacterias simbióticas fijadoras de nitrógeno o de vida libre y hongos micorrízicos. Estos organismos a menudo son limitados por el manejo de cultivos agrícolas, como la aplicación excesiva de nitrógeno, fósforo y potasio al suelo, el uso inmoderado de pesticidas, tipo de labranza, monocultivo y rotación de cultivos (Guerra-Sierra, 2008). El alto uso de insumos sintéticos en la agricultura contemporánea, puede generar altos rendimientos en los cultivos, pero en general desaprovecha el beneficio de los organismos que interactúan con las plantas. En contraste, los sistemas naturales hacen lo contrario. Tanto los sistemas naturales, como los agro-ecosistemas de manejo orgánico, son más perdurables y sostenibles que los sistemas de agricultura intensiva. La fragilidad de los ecosistemas ha sido ampliamente documentada. Por ejemplo, en áreas donde ciertas fuentes de nitrógeno contaminan el suelo y el aire, se restringe el crecimiento de especies de líquenes, los cuales son dieta de dos especies de primates en peligro de extinción (Wang *et al.*, 2020).

Interacción bacterias-insectos

Dentro de los insectos viven inter o intracelularmente microorganismos como bacterias, hongos, nematodos, fitoplasmas, además de virus; la mayoría son benéficos o no perjudiciales, pero algunos son patógenos o parásitos. La bacteria *Wolbachia* está ampliamente distribuida en los artrópodos y nematodos, ella puede matar, influenciar en la reproducción de insectos de plagas agrícolas y de insectos vectores de enfermedades de humanos y animales (Rodríguez, 2013). Al invadir el cerebro de insectos,

By invading the brains of insects, *Wolbachia* can affect their learning, memory, mating, feeding and aggregation; hence, its great potential to control insects is considered harmful to humans (Bi and Wang, 2020). For example, *Wolbachia* invades *Trichogramma*, a parasitoid wasp, and induces differentiated parthenogenesis, with the resulting development of an exclusively female population, which are a parasite to pest insects (Rodríguez, 2013). Beneficial insects can acquire pathogenic microorganisms, which can decimate their populations and persist in all the stages of their life cycle (Samaniego-Gaxiola *et al.*, 2019); likewise, pest insects can also be affected by microorganisms (Zimmermann *et al.*, 2013). The approach is to focus on finding and using organisms that affect harmful organisms in a negative way and beneficial organisms to agricultural crops in a positive way.

Genetics of crops

Crops were originally developed by humans, using selection processes (phenotypical criteria). Modern agriculture is based on the manipulation of plant genetics. However, three aspects make it difficult to use and understand the interaction between the environment and the genetic expression of plants: **a)** “Jumping genes” or transposons, DNA sequences that move and interact in the genome. In maize, they are found in approximately 80% (Eguiarte *et al.*, 2013); **b)** the pangenome, or genes different to the rest of the clade; in the case of the grass species *Brachypodium distachyon* (L.) Beauv., the genes of its population are 61 thousand and each individual has 30 thousand (Gordon *et al.*, 2017); **c)** a scarce understanding of the genetic regulation of plants in extreme environments, such as the conifers that survived the Chernobyl radiation (Geras'kin *et al.*, 2011). That is, cultivated and native plants still have an enormous potential to detect their genetic

Wolbachia puede afectar su aprendizaje, memoria, apareamiento, alimentación y agregación, de ahí su gran potencial para el control de insectos dañinos para el hombre (Bi y Wang, 2020). Por ejemplo, *Wolbachia* invade a *Trichogramma*, avispa parasitoide, e induce partenogénesis diferenciada, con el consecuente desarrollo de una población exclusiva de hembras, que son las que parasitan a los insectos plaga (Rodríguez, 2013). Los insectos benéficos pueden adquirir microorganismos patógenos, los cuales pueden diezmar su población y persistir en todos los estadios de su ciclo de vida (Samaniego-Gaxiola *et al.*, 2019; o bien, los insectos plaga también pueden ser atacados por microorganismos (Zimmermann *et al.*, 2013). El enfoque es centrarse en detectar y utilizar organismos que afecten negativamente a organismos perjudiciales y positivamente a organismos benéficos de cultivos agrícolas.

Genética de los cultivos

Los cultivos originalmente fueron desarrollados por procesos de selección empírica por el ser humano. Fue un proceso de selección con criterios fenotípicos. La agricultura moderna se fundamenta en manipular la genética de plantas. Sin embargo, al menos, tres aspectos dificultan aprovechar y entender la interacción entre el medio ambiente y la expresión genética de plantas: **a)** Los “genes flotantes” o transposones, secuencias de ADN que se mueven e interactúan en el genoma. En maíz se encuentran en aproximadamente un 80 % (Eguiarte *et al.*, 2013); **b)** el pangenoma, o genes distintos de todo el clado, en el caso de la gramínea *Brachypodium distachyon* (L.) Beauv., los genes de su población son 61 mil y de cada individuo 30 mil (Gordon *et al.*, 2017); **c)** poca comprensión de la regulación genética de las plantas en ambientes extremos, como el caso de las coníferas que sobrevivieron a la radiación de Chernóbil (Geras'kin *et*

and epigenetic characteristics to help them adapt to different types of biotic or abiotic stresses, or to new ways of doing agriculture. The benefit would be the use of local or regional genetic resources without depending on commercial varieties from foreign or multinational companies (H. Cortez in this Special Edition). COVID-19 displayed the danger of depending on inputs with the rupture of supply chains, and with that, the risk of food self-sufficiency.

Endosymbiosis, endophytes, mycorrhizae, parasites and pathogens

Larger organisms (animals, arthropods or plants) interact and host thousands of smaller ones (mainly microorganisms), conforming a unit or consortium called a *holobiome*, with its respective *hologenome*. As the knowledge on the interactions between organisms arises, the conceptual terms mix or are modified. Bacteria of the genus *Rhizobium* and their related species can be considered plant endosymbionts. However, endosymbiosis may indicate that an organism was integrated into another, such as chloroplasts and mitochondria, which integrated to become plant and animal cells, respectively; or bacteria that live inside insect cells (Espinosa, 2019). Likewise, some mycorrhizae (endomycorrhizae) can live inter or intracellularly in plant roots and can therefore be classified as endophytic fungi. When interactions between organisms are harmful to at least one of them, we say there is an *antagonism*. An insect can be the *parasite* of plants i.e., live at their expense, causing damage or transmitting viral diseases. Meanwhile, fungi, bacteria, nematodes, and weeds can be *phytoparasites* and/or *phytopathogens* (causing diseases) in plants. Animals, weeds and microorganisms themselves have their own *parasites* and/or *pathogens*. There is a very fine

al., 2011). Es decir, aún existe en las plantas cultivadas y nativas un enorme potencial para detectar sus características genéticas y epigenéticas que les permita adaptarse a diversos tipos de estrés abiótico o biótico, nuevas formas de hacer agricultura. El beneficio sería el empleo de recursos genéticos locales o regionales sin la dependencia de variedades comerciales de empresas foráneas o transnacionales (H. Cortez en este Número Especial). COVID-19 evidenció el peligro de la dependencia de insumos con la ruptura de cadenas de suministros y con ellos el riesgo de autosuficiencia alimentaria.

Endosimbiosis, endófitos, micorrizas, parásitos y patógenos

Los organismos de mayor tamaño (animales, artrópodos o plantas) interactúan y albergan cientos o miles de menor tamaño (principalmente microorganismos), conformando una unidad o consorcio denominada *holobioma*, con su respectivo *hologenoma*. Conforme se incrementa el conocimiento de las interacciones entre organismos, los términos se entremezclaron o modificaron. Las bacterias del género *Rhizobium* y sus especies relacionadas se pueden considerar endosimbiontes de plantas. Sin embargo, la endosimbiosis puede indicar que un organismo se integró dentro de otro, como podrían ser los cloroplastos y mitocondrias, que se integraron para formar células vegetales y animales, respectivamente; o las bacterias que viven dentro de células de insectos (Espinosa, 2019). Asimismo, algunas micorrizas (endomicorrizas), pueden vivir inter o intracelularmente en las raíces de plantas, por lo que se pueden clasificar como hongos endófitos. Cuando las interacciones entre organismos son perjudiciales, al menos para uno de ellos, decimos que existe un *antagonismo*. Un insecto puede ser *parásito* de plantas i.e., vivir a expensas de ellas, causándoles daño o transmitir enfermedades virales.

line between the levels of interaction of a *parasite* and/or *pathogen*, from not becoming one or to stop from being one; this is determined by the affecting organism (*parasite* or *pathogen*), the organism affected (host) and their surrounding environment (Chitnis *et al.*, 2020; Sugio *et al.*, 2015).

Endophytes in plants and insects

In nature, microorganisms often have more than one function in different moments. Thus, *Metarhizium* can be saprobic (feeding off organic residues), entomopathogenic (attacks and kills insects) and endophytic. In turn, *Trichoderma* can mycoparasite *Rhizoctonia* and other plant pathogens, but can also be saprobic and endophytic; its metabolism changes in endophytes according to the role they play (Sugio *et al.*, 2015). The seed, the vegetative material, the rhizosphere and the phyllosphere are points of entry and propagation of endophytic microorganisms (Lata *et al.*, 2018). These endophytic microorganisms can help plants counteract different types of biotic stresses such as pests, diseases, predators, weeds and invading plants, on the one hand, and abiotic stresses such as temperature, salinity, drought, pH, nutrients and heavy metals on the other. Plants respond to this type of stress by changing their physiology, metabolism and morphology. This can happen when they associate with endophytes, which **a**) induce plant gene regulation, in a function known as *induced resistance* (Lata *et al.*, 2018); **b**) produce beneficial metabolites for plants and harmful to weeds, pests and pathogens; some of these metabolites are phytohormones, antioxidants, alkaloids, terpenoids, derivatives of isocoumarin, quinones, flavonoids, chlorinated metabolites, phenol, phenolic acids, and others (Kaur, 2020; Torres and White, 2010). Other changes caused by endophytes in or around plants are: **1**) they act as

Mientras que los hongos, bacterias, nematodos y malezas pueden ser *fitoparásitos* y/o *fitopatógenos* (causando enfermedad) en las plantas. Los animales, las malezas y los propios microorganismos tienen sus *parásitos* y/o *patógenos*. Hay una línea muy sutil entre los diferentes niveles de interacción de un *parásito* y/o *patógeno*, de no convertirse o dejar de serlo; esto está determinado por el organismo que afecta (*parásito* o *patógeno*), el afectado (hospedero) y el ambiente que los circunscribe (Chitnis *et al.*, 2020; Sugio *et al.*, 2015).

Endófitos en plantas e insectos

En la naturaleza, los microorganismos suelen tener más de una función en distintos momentos. Así, *Metarhizium* puede ser saprobio (se alimenta de residuos orgánicos), entomopatógeno (ataca y mata insectos) y endófito; mientras que *Trichoderma* puede micoparasitar a *Rhizoctonia* y otros fitopatógenos, pero también puede ser saprobio y endófito; su metabolismo cambia en los endófitos según el papel que desempeñen (Sugio *et al.*, 2015). La semilla, el material vegetativo, la rizósfera y la filósfera son puntos de entrada y propagación de microorganismos endófitos (Lata *et al.*, 2018). Estos microorganismos endófitos pueden ayudar a las plantas a contrarrestar diversos tipos de estrés biótico como plagas, enfermedades, depredadores, malezas y plantas invasoras; y estrés abiótico como temperatura, salinidad, sequía, pH, nutrientes y metales pesados. Las plantas responden a estos tipos de estrés al cambiar su fisiología, metabolismo y morfología. Esto puede ocurrir cuando se asocian con endófitos, los que: **a**) inducen regulación de los genes de la planta. Función reconocida como *resistencia inducida* (Lata *et al.*, 2018); **b**) producen metabolitos benéficos para las plantas y perjudiciales para malezas, plagas y fitopatógenos, algunos de esos metabolitos son fitohormonas,

antagonisms against plant-harming organisms such as fungi, nematodes, bacteria and insects (they parasitize, compete, lyse, inhibit, intoxicate, prey); **2**) they solubilize nutrients for the plant; **3**) degrade plant or crop residues, which improves structural properties (aggregates) and soil fertility.

Endophyte-insect associations can be beneficial or harmful to insects. The microbiota inside the insects is ten times as numerous as the cells of insects. Endophytic bacteria inside the intestines of insects are crucial to them, since they directly or indirectly provide essential nutrients, fixate nitrogen and even synthesize part of their pheromones and allomones, which they use to communicate (Poveda-Arias, 2019). Insects may host microorganisms and viruses, some of which are harmful, inside their intestines or intracellularly. A long list of harmful microorganisms is known to act as pests to agricultural crops, including the codling moth *Cydia pomonella*; its pathogens, viruses, bacteria, fungi, microsporidia and nematodes were found after analyzing over 20 thousand specimens between larvae, pupae and adults in the years between 1952 and 2012 (Zimmermann *et al.*, 2013). Insects can transfer part of their microbiota to plants (including endophytes) and vice versa, where a gene transfer can occur, to the plant and from the plants to insects (Sugio *et al.*, 2015).

Endophytes and their benefits

The plant *Dichanthelium lanuginosum* can survive temperatures between 38 and 65 °C when associated to the endophytic fungus *Curvularia protuberata* (Redman *et al.*, 2002). *Leymus mollis*, known as “American dune grass”, lives next to beaches. When the plant has an endophytic relation with the fungus *Fusarium culmorum*, it displays no symptoms of wilt when kept for 14 days in a 500 mM solution of NaCl (Rodríguez *et al.* 2008). The 300 thousand plant species have

antioxidantes, alcaloides, terpenoides, derivados de isocumarina, quinonas, flavonoides, metabolitos clorados, fenol y ácidos fenólicos, entre otros (Kaur, 2020; Torres y White, 2010). Otros cambios que los endófitos causan dentro o alrededor de las plantas son: **1**) antagonismo en contra de organismos perjudiciales de las plantas como hongos, nematodos, bacterias e insectos (parasitan, compiten, lisan, inhiben, intoxican, depredan); **2**) solubilizan nutrimentos para la planta; **3**) degradan residuos de plantas o cosechas, lo que mejora propiedades de estructura (agregados) y fertilidad de los suelos.

Las asociaciones endófitos e insectos pueden ser benéficos o perjudiciales para los insectos. La microbiota dentro de los insectos es diez veces más numerosa que las células del propio insecto. Las bacterias endófitas dentro del intestino de los insectos son indispensables para ellos, ya que proporcionan de manera directa o indirecta nutrimentos esenciales, fijan nitrógeno e incluso sintetizan parte de sus feromonas y alelomonas, con las que se comunican (Poveda-Arias, 2019). Los insectos pueden alojar microorganismos y virus dentro de su intestino o intracelularmente, algunos de ellos son perjudiciales. Una larga lista de microorganismos perjudiciales se conoce para plagas de cultivos agrícolas. Entre ellos destaca la palomilla del manzano *Cydia pomonella* L., donde se detectaron sus patógenos, virus, bacterias, hongos, microsporidios y nematodos, después de analizar más de 20 mil ejemplares entre larvas, pupas y adultos entre los años 1952 a 2012 (Zimmermann *et al.*, 2013). Los insectos pueden transferir parte de su microbiota a las plantas (incluyendo endófitos) y viceversa, en donde puede haber transferencia de genes a la planta y de la planta a los insectos (Sugio *et al.*, 2015).

Endófitos y su beneficio

La planta *Dichanthelium lanuginosum* (Ell.) Gould puede sobrevivir entre 38 a 65 °C al aso-

one to two main endophytic fungi (Kaur, 2020). Additional applications of endophytic fungi include **a**) bioremediation, since they accumulate, degrade and detoxify heavy metals in plants; **b**) biomedicine, from the production of anti-cancer compounds and antibiotics to nanoparticles; **c**) the production of biodiesel; and **d**) the production of industrial enzymes (Yan *et al.*, 2018). *Trichoderma* spp., in addition to being endophytic, produces hydrophobin-type proteins, which, paired with enzymes, degrade PET plastics, which are currently important pollutants worldwide (Druzhinina, 2017).

Trichoderma* and *Metarhizium

The species of *Trichoderma* are widely used since, among other beneficial characteristics to plants, their potential to produce plant hormones stands out for stimulating growth in agricultural crops (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2019). Since the 1990s, the species of this fungal genus are widely used as a biological control since they inoculate seeds (Mukhopadhyay *et al.*, 1992). In association with *Trichoderma harzianum*, over 278 volatile compounds were identified, some with a potential for fumigation (Siddiquee *et al.*, 2012). The genus *Trichoderma* has been estimated to have 400 species, some of which blend all the characteristics of endophytes mentioned, including the characteristics of growth-promoting bacteria (Sharma *et al.*, 2019). Another fungus with a potential for pest control is *Metarhizium* spp., which has a wide variety of species and is entomopathogenic to a wide variety of insects in Mexico and many other countries (Brunner-Mendoza *et al.*, 2019; Hernández-Rosas *et al.*, 2019). *Metarhizium anisopliae* has been used extensively and successfully for pests as important as locusts (*Schistocerca gregaria*) and grasshoppers (*Zonocerus variegatus*). With 2.5×10^{12} conidia/

ciarse con el hongo endófito *Curvularia protuberata* Nelson (Redman *et al.*, 2002). *Leymus mollis* (Trin.) Pilg., conocida como “la hierba de duna”, habita aledaña a las playas. Cuando la planta mantiene una relación endófitica con el hongo *Fusarium culmorum* Wm.G.Sm., no muestra síntomas de marchitez al permanecer en una solución de NaCl 500 mM durante 14 días (Rodríguez *et al.* 2008). Las 300 mil especies de plantas poseen entre uno a dos hongos endófitos principales (Kaur, 2020). Algunas aplicaciones adicionales de los hongos endófitos son: **a**) biorremediación, pues acumulan, degradan y desintoxican metales pesados en plantas; **b**) biomedicina, desde producción de compuestos anticancerígenos, antibióticos hasta nanopartículas; **c**) producción de biodiésel; y **d**) producción de enzimas industriales (Yan *et al.*, 2018). *Trichoderma* spp., además de ser endófito, produce proteínas tipo hidrofobinas, que acopladas a enzimas degradan plásticos PET, que actualmente representan contaminantes importantes a nivel mundial (Druzhinina, 2017).

Trichoderma* y *Metarhizium

Las especies de *Trichoderma* son utilizadas ampliamente debido a que, entre otras características benéficas para las plantas, destaca su potencial para producir hormonas vegetales que estimulan el crecimiento de los cultivos agrícolas (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2019). Desde los años 90s, las especies de este género de hongo son ampliamente utilizadas como control biológico al inocular semillas (Mukhopadhyay *et al.*, 1992). En asociación con *Trichoderma harzianum* Rifai, fueron identificados más de 278 compuestos volátiles, algunos con potencial fumigante (Siddiquee *et al.*, 2012). Se calcula que el género *Trichoderma* podría tener 400 especies, y que algunas de ellas conjuntan todas las características de los endófitos mencionadas,

ha, *S. gregaria* can be controlled under moderate temperatures and in the nymph state of the insect (Van der Valk, 2007).

Beneficial organisms and agricultural sustainability

In addition to the problem of neglecting arable land, there is soil contamination and erosion. Every year, the worldwide use of pesticide *per capita* is one pound. Alongside this, in Mexico, highly dangerous pesticides are still used which are illegal in other countries that have more rigorous control systems (Bejarano, 2018). The successful use of beneficial organisms in agriculture undoubtedly brings us closer to sustainability. To reach such a goal, the ways of practicing science and technology and their application must be improved. A research agenda is also necessary to use endophytes, nitrogen fixators, insects for pest control and other beneficial organisms for agriculture and human activity. In Mexico, information on entomopathogens for agricultural and forest crops was recently reviewed (Pacheco Hernández *et al.*, 2019). Information was also reviewed for specific genera such as *Metarhizium* (Brunner-Mendoza *et al.*, 2019; Hernández-Rosas *et al.*, 2019) and *Trichoderma* (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2019). Additionally, Mexico has a National Agri-food Health, Safety and Quality Service (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria) which has technical and biological information in the National Biological Control Reference Center (Centro Nacional de Referencia de Control Biológico), which has an important collection of entomopathogenic fungi. Recently, SADER established a National Genetic Resource Center with microbiological collections of interest to agriculture (Zelaya-Molina and Col. in this Special Edition). Mexico, a leader in

incluyendo características de las bacterias promotoras del crecimiento (Sharma *et al.*, 2019). Otro hongo con un potencial para el control de plagas es *Metarhizium* spp., quien tiene una amplia diversidad de especies y es entomopatógeno de una amplia gama de insectos en México y muchos países (Brunner-Mendoza *et al.*, 2019; Hernández-Rosas *et al.*, 2019). *Metarhizium anisopliae* (Metchnikoff) Sorokin se ha utilizado extensivamente y con éxito para plagas tan importantes como la langosta (*Schistocerca gregaria* Forsskål) y el saltamontes (*Zonocerus variegatus* L.). Con 2.5×10^{12} conidios/ha se puede controlar *S. gregaria* en temperatura moderada y estadio de ninfa del insecto (Van der Valk, 2007).

Organismos benéficos y la sostenibilidad agrícola

Adicional al problema del abandono de la tierra cultivable, está la contaminación y erosión del suelo. Cada año, el consumo a nivel mundial per cápita de pesticidas es de una libra; En adición, en México aún se utilizan pesticidas altamente peligrosos y prohibido en otros países con sistemas más rigurosos de control (Bejarano, 2018). El uso exitoso de organismos benéficos para la agricultura sin duda nos acercaría a la sustentabilidad. Para alcanzar tal fin, se debe mejorar las formas de hacer ciencia, tecnología y su aplicación. También es necesaria una agenda de investigación para utilizar endófitos, fijadores de nitrógeno, insectos para el control de plagas y demás organismos benéficos para la agricultura y la actividad humana. En México, la información de entomopatógenos benéficos para cultivos agrícolas y forestales se revisó recientemente (Pacheco Hernández *et al.*, 2019). También se ha revisado para géneros específicos como *Metarhizium* (Brunner-Mendoza *et al.*, 2019; Hernández-Rosas *et al.*, 2019) y *Trichoderma* (Guzmán-Guzmán *et al.*, 2019). Adicionalmente, nuestro país

Latin America in the application of the biological control in its official pest management model, has a directory of biological control agent-reproducing and commercializing laboratories in Mexico (SENASICA, 2020). Thus, Mexico has over 70 laboratories that produce beneficial organisms for agriculture and their number can be higher if low-scale artisanal productions are included. Ten years ago, the increase in the use of beneficial organisms for agricultural crops in Mexico was envisaged (García de León and Mier, 2010). In Mexico, the activities of the Mexican Biological Control Society (*Sociedad Mexicana de Control Biológico*), with over 500 members, display the relevance of this sustainable approach: 43 National Conferences in over 30 cities throughout the country; 6,500 talks; 51 national courses and 200 workshops in which over 6 thousand technicians and farmers have been trained (R. Lomelí. 2020. Personal communication). Cotes (2018) analyzes the current view of the status and potential in the use of beneficial organisms for plants with success stories in pest and disease control, as well as the challenges for the consolidation of biological control.

The current and potential impact of beneficial organisms

The massive adoption and economic impact of beneficial organisms (predator insects, parasitoids, growth-promoting bacteria, entomopathogens and endophytes) are limited in the world, although there are exceptions, such as the forage endophytes in New Zealand, which provide 200 million dollars a year; likewise, the number of patents of beneficial organisms is limited (Chitnis *et al.*, 2020). Mexico has successfully applied biological control with beneficial insects and fungi, the most outstanding of which are the control of locusts

cuenta con un Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria donde se tiene información técnica y biológica en el Centro Nacional de Referencia de Control Biológico, el cual posee un importante acervo de hongos entomopatógenos. Recientemente, SADER estableció un Centro Nacional de Recursos Genéticos con acervos microbiológicos de interés para la agricultura (Zelaya-Molina y Col. en este Número Especial). México, líder en Latinoamérica en la aplicación del control biológico en su modelo oficial de manejo de plagas, cuenta con un directorio de laboratorios reproductores y comercializadores de agentes de control biológico en México (SENASICA, 2020). Así, México cuenta con más de 70 laboratorios que producen organismos benéficos para la agricultura y su número puede ser más si se incluyen producciones artesanales en baja escala. Desde hace 10 años se vislumbraba el crecimiento del uso de organismos benéficos para cultivos agrícolas en México (García de León y Mier, 2010). En México, las actividades de la *Sociedad Mexicana de Control Biológico*, con más de 500 socios, muestra la vigencia de este enfoque sustentable: 43 Congresos Nacionales en más de 30 ciudades del país; 6500 ponencias; 51 cursos nacionales y 200 talleres en los que se han capacitado más de 6000 técnicos y agricultores (R. Lomelí. 2020. Comunicación Personal). Cotes (2018), analiza el panorama actual del estatus y potencial del uso de organismos benéficos para las plantas con casos exitosos en el control de plagas y enfermedades, así como los retos para consolidar el control biológico. Similarmente, la Sociedad Mexicana de Control Biológico

Impacto actual y potencial de organismos benéficos

La adopción masiva y el impacto económico de los organismos benéficos (insectos depredadores,

Schistocerca piceifrons piceifrons and of the fruit fly *Ceratitis capitata* Wiedemann. In 2013, Mexico stood out for being the country with the third highest production of *Trichogramma* spp., but particularly for its megadiversity of beneficial insects, some of which were successfully used to control pests in other countries (Williams *et al.*, 2013). Some of which we can highlight are the genera of the bacteria *Wolbachia* and of the fungus *Trichoderma*. The former is strategic for the development of the biological control of pest insects (Bi and Wang, 2020) and the latter stands out for its habitat distribution and versatility for use in agriculture, biotechnology and bioremediation (Hu *et al.*, 2020; Guzmán-Guzmán, *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2019). Appropriately and massively detecting, selecting and using beneficial organisms for cultivated plants would have an impact on one or more of the following components: **a)** mitigating different types of stress (biotic or abiotic); **b)** optimization of the use of water and fertilizers; **c)** reduction in the use of pesticides and fertilizers; **d)** increase in yield. All this would help reduce damages caused by new weeds, pests and diseases (invasive), as well as the effects of climate change; it would reduce pollution caused by agricultural activities and, in sum, agriculture would become increasingly sustainable (Chitnis *et al.*, 2020; Kaur, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018; Poveda, 2018; Williams *et al.*, 2013).

Generation of knowledge and innovation

To escalate the beneficial functional relations towards a worldwide sustainable agriculture it is necessary to redirect investigation towards the production of knowledge that helps implement technology that is innovative and applicable to an agriculture, whether of traditional production or

parasitoides, bacterias promotoras del crecimiento, entomopatógenos y endófitos) son limitados en el mundo, aunque hay excepciones, como los endófitos de forrajes en Nueva Zelanda que benefician en 200 millones de dólares anualmente; asimismo, el número de patentes de organismos benéficos es limitado (Chitnis *et al.*, 2020). México ha aplicado exitosamente el control biológico con insectos y hongos benéficos. Destacan el control de la langosta *Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker y la mosca de la fruta *Ceratitis capitata* Wiedemann. En 2013, México destacó por ser el tercer país con más producción de *Trichogramma* spp.; pero, sobre todo, por su megadiversidad de insectos benéficos, algunos de ellos utilizados exitosamente para el control de plagas en otros países (Williams *et al.*, 2013). De manera significativa, destacan los géneros de la bacteria *Wolbachia* y del hongo *Trichoderma*; la primera, se erige como estratégica para un desarrollo del control biológico de insectos plaga (Bi y Wang, 2020); el segundo, sobresale por su distribución de hábitat y versatilidad para aplicarse en agricultura, biotecnología y biorremediación (Hu *et al.*, 2020; Guzmán-Guzmán, *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2019). Al detectar, seleccionar y utilizar apropiada y masivamente organismos benéficos para las plantas cultivadas, se impactaría en uno o más de los siguientes componentes: **a)** mitigar diversos tipos de estrés (bióticos o abióticos); **b)** optimización del uso de agua y fertilizantes; **c)** disminución del uso de pesticidas y fertilizantes; **d)** incremento del rendimiento. Todo ello, ayudaría a reducir los daños por nuevas malezas, plagas y enfermedades (invasoras), así como los efectos del cambio climático; atenuaría la contaminación por la actividad agrícola y, en suma, se migraría hacia una agricultura sostenible (Chitnis *et al.*, 2020; Kaur, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018; Poveda, 2018; Williams *et al.*, 2013).

an intensive and extensive production agriculture. The laboratory model that currently prevails must be complemented with work on the fields. In the context of COVID-19, the window of opportunity amidst the world's need for food, as well as the sustainability and food security facing the crisis of supply of inputs required mainly by middle and high technology agriculture must be used to create an agriculture of the future in line with the enormous climate, food and health challenges. Investigation for an avant-garde and sustainable agriculture must include: **a)** systemic studies of the beneficial organisms-plant relations at a field level; **b)** a scientific clarification of how such relations work; **c)** if they work, is it as a holobiom?; **d)** How does the environment affect functional relations?; **e)** How is the original holobiom of plants affected by the beneficial organisms-plant relations? And what would be the consequences for plants?; **f)** Identification of highly specific organisms, beneficial to plants, considering the integration of plant genomes in its genome; **g)** How would agricultural practices impact the beneficial organisms-plant relations? (Chitnis *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2013).

Perspectives

Mexico lacks a national beneficial organisms database for agriculture, although the vast official collections are merit worthy (SENASICA, 2020). They could be set up to optimize the study and application of beneficial organisms. Ecological studies at a national scale on beneficial organisms are also necessary, similar to those carried out in China for *Trichoderma* spp. (Hu *et al.*, 2020). The isolations or strains of microorganisms (including viruses that attack insects), as well as specimens of parasitoid and predatorial insects, should be

Generación de conocimiento e innovación

Para escalar las relaciones funcionales benéficas hacia una agricultura sostenible a nivel mundial es necesario reenfocar la investigación a generar conocimiento que permita la implementación tecnológica innovadora y aplicable a una agricultura, tanto de producción tradicional, como a una de producción intensiva y extensiva. El modelo de laboratorio que actualmente prevalece debe complementarse con el campo. En el contexto COVID-19, la ventana de oportunidad ante la necesidad mundial de alimentos, la sustentabilidad y seguridad alimentarias ante la crisis de suministros de insumos requeridos principalmente por la agricultura de mediana y alta tecnología debe aprovecharse para construir una agricultura del futuro acorde con los grandes retos climáticos, alimentación y salud. La investigación para una agricultura vanguardista y sustentable debe incluir: **a)** estudios sistémicos de las relaciones organismos benéficos-planta a nivel de campo; **b)** esclarecer científicamente ¿Cómo funcionan dichas relaciones?; **c)** si tales relaciones funcionan ¿Lo hacen como un holobioma?; **d)** ¿Cómo influye el ambiente en las relaciones funcionales?; **e)** ¿Cómo el holobioma original de las plantas se afecta por las relaciones de organismos benéficos-planta? y ¿Cuáles serían las consecuencias para las plantas?; **f)** Identificar organismos benéficos altamente específicos para las plantas tomando en cuenta la integración en su genoma de genes de la planta; **g)** ¿Cómo impactan las prácticas agrícolas en las relaciones organismos benéficos-planta? (Chitnis *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018;; Williams *et al.*, 2013).

Perspectivas

México carece de una base de datos nacional de organismos benéficos para la agricultura, aunque son

recorded in a national database with agronomic and ecological information attached to each record. The way to generate investigation, technology and the adoption of farming technology must be consolidated. In this sense, India sets the example with the ‘*National Agricultural Innovation Project*’, constituted in 2014 with a fund of 257 million dollars and which gathered 850 work groups (investigators, technologists, extensionists and producers). A part of the project focused on species for the biological control of pests and diseases such as *Trichogramma*, *Chrysoperla*, *Trichoderma* and *Pseudomonas*. The finding of *Chrysoperla zastrowi sillemi* is worth highlighting, since endophytic bacteria and fungi were found which had the ability to confer resistance to insecticides, desiccation and temperature (Hemalatha *et al.*, 2014; Hemalatha, 2015). With four *C. zastrowi sillemi* larvae in a greenhouse, the amount of *Myzus persicae* per tomato plant was kept at 0.5 or less, as well as one whitefly *Bemisia tabaci* or less (Nair *et al.*, 2020).

Communication between researchers, producers and marketers of biological agents is crucial, and particularly the exchange of experiences, microorganisms and beneficial insects between researchers. This would require a regulation of the rights that researchers and institutions may have on the organisms. In addition to organisms that are beneficial to agriculture, organisms useful to other areas such as medicine, bioremediation, etc. must also be explored. The creation of public policies that lead to a national research agenda where public and private institutions and producers participate is also urgent. Internationally, there is a growing interest towards promoting comprehensive research and development systems that transcend academic interest. Only in this way will there ever be an impact on sustainable agriculture models (Chitnis *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2013).

meritorias las vastas colecciones oficiales (SENASICA, 2020). Esta podría habilitarse para optimizar el estudio y aplicación de organismos benéficos. Es también necesario estudios ecológicos a nivel nacional sobre organismos benéficos, semejantes a los realizados en China para *Trichoderma* spp. (Hu *et al.*, 2020). Los aislados o cepas de microorganismos (incluyendo virus que atacan insectos), así como ejemplares de insectos parasitoides y depredadores, deberían ser registrados, en una base de datos nacional, con información agronómica y ecológica asociada a cada registro. La forma de generar investigación, tecnología y la adopción de tecnología agropecuaria debe consolidarse. Al respecto, la India ejemplifica con el proyecto ‘*National Agricultural Innovation Project*’, constituido en 2014 con un fondo de 257 millones de dólares, conjuntó 850 grupos de trabajo (investigadores, tecnólogos, extensionistas y productores). Una parte del proyecto, se enfocó en especies útiles para el control biológico de plagas y enfermedades como *Trichogramma*, *Chrysoperla*, *Trichoderma* y *Pseudomonas*. Destaca la obtención de *Chrysoperla zastrowi sillemi* (Esben-Petersen), donde se encontraron bacterias y hongos endófitos capaces de conferir resistencia a insecticidas, desecación y temperatura (Hemalatha *et al.*, 2014; Hemalatha, 2015). Con cuatro larvas de *C. zastrowi sillemi* en invernadero, se logró mantener en 0.5 o menos individuos de *Myzus persicae* (Sulzer) y una o menos mosquita blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius) por planta de tomate (Nair *et al.*, 2020).

Es imprescindible la comunicación entre investigadores, productores y comercializadores de agentes biológicos. Particularmente fomentarse el intercambio de experiencias, microorganismos e insectos benéficos entre investigadores. Para ello, habrá que regular los derechos que los investigadores e instituciones tengan sobre los organismos. Además de organismos benéficos a la agricultura,

Final considerations

At a field or greenhouse level, we can realize the impact of a stress factor on crops and how they affect their relations with pests and diseases (Polack, 2008; Samaniego *et al.*, 2008). Therefore, gathering information on crop management is crucial to apply and improve biological control and obtain other benefits from organisms with endophytic abilities. We may have to consider gene modification and expression (epigenetic) induced by endosymbionts, as well as its impact in the holobiont microorganisms-insects-plant (Chitnis *et al.*, 2020; Poveda, 2019; Sugio *et al.*, 2015). For example, the bacteria that live intracellularly in aphids, inside cells called bacteriocytes, lose a large portion of their genome (Espinosa, 2019). In rice, pea, pigeon pea, chickpea, maize, soybean, tomato and wheat, over 100 genera of beneficial endophytic fungi have been found. Up to 60% of them were found in one crop and 8% (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Piriformospora* and *Trichoderma*) in all eight crops. In this way, there is a combination of specific fungi *versus* generalists (Rana *et al.*, 2019). Therefore, it is common to find beneficial or generalist endophytes, generally common soil fungi, except for *Piriformospora indica* (Liu *et al.*, 2020). This fungus has a wide variety of host plants that it protects from phytopathogens, this could be evaluated in Mexico as a beneficial endophyte, likewise *Trichoderma* spp. isolations from different collections in the country. The specificity of endophytes goes beyond their ability to associate with plants; it represents an enzymatic functional diversity, typical of an adaptation to a plant lifestyle (Knapp *et al.*, 2018). The experience of our laboratory suggests that we can find large amounts of endophytes, most of which are abundant in some soils. A quick way of

también se debe explorar organismos útiles en otras áreas como medicina, biorremediación, etc. Urge general política pública orientada a direccionar una agenda de investigación nacional donde participen instituciones públicas, privadas y productores. A nivel internacional existe un creciente interés por impulsar sistemas integrales de investigación y desarrollo que trascienda el interés académico. Solo así se podrá impactar en modelos sostenibles agrícolas (Chitnis *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2019; Cotes *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2013).

Consideraciones finales

A nivel de campo o invernadero, nos podemos percatar del impacto que tienen un factor de estrés en cultivos y cómo afectan su relación con plagas y enfermedades (Polack, 2008; Samaniego *et al.*, 2008). Por consiguiente, recabar información de manejo del cultivo es crucial, para aplicar y mejorar el control biológico y obtener otros beneficios de organismos con capacidad endófito. Habrá que tomar en cuenta la modificación de genes y su expresión (epigenética) inducida por endosimbiontes, así como su impacto entre el holobionta microorganismos-insectos-planta (Chitnis *et al.*, 2020; Poveda, 2019; Sugio *et al.*, 2015); por ejemplo, las bacterias que viven intracelularmente en los pulgones, dentro de células llamadas bacteriocitos, pierden gran parte de su genoma (Espinosa, 2019). En los cultivos de arroz, chícharo, frijol gandú, garbanzo, maíz, soya, tomate y trigo se han encontrado más de 100 géneros de hongos endófitos benéficos. Hasta 60% de ellos en un solo cultivo y 8% (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Piriformospora* y *Trichoderma*) en los ocho cultivos. Así, se tiene una combinación de hongos específicos *versus* generalistas (Rana *et al.*, 2019). Por tanto, es común encontrar endófitos benéficos específicos o generalistas, por

knowing if they have a possible relation with roots is to make them grow in a conventional medium (PDA) and then place seeds. The seeds with an affinity to the fungus germinate and grow roots in the culture medium (Figure 1). In this way, we would find a large number of fungi with an affinity to cultivated plants in a country as megadiverse as Mexico. Seeds and seedlings can be inoculated with the selected fungi, which would provide a very large number of plant responses. At the end of the cultivation cycle, it would be possible to isolate an inoculated fungi if it has an endophytic activity. (Figura 2) (J. Samaniego. Data not published),

The beneficial interactions model of the organisms should be emulated among all the sectors interested in this alternative. Researchers should be able to exchange isolations, experiences and support regional collaboration models. Businesses that reproduce microorganisms for biological control and biofertilizers could sell them. All this within a framework that protects copyrights. The final purpose of the investigation is to generate technology for the farmer. Perseverant and cooperative work in research usually results in an economic impact. The entomopathogen *Ophiocordyceps sinensis*, possesses properties in medicine, which makes its value worth 1.2 million pesos per kilogram, additionally, it benefit the scientific and industrial sectors (Li *et al.*, 2019).

The sustainability aims to maintain human health, that would allow a better facing of this and further pandemics, by producing food that strengthen the immune system. Moreover, the food production would require less supplies or a better management of these attenuate the abiotic and biotic stresses, all of these through the association of beneficial organisms to the plants.

lo general hongos comunes del suelo, excepto *Piriformospora indica* (Liu *et al.*, 2020). Este hongo tiene una amplia gama de plantas hospederas a las que protege de fitopatógenos. Podría evaluarse en México como endófito benéfico al igual que aislados de *Trichoderma* spp. provenientes de distintas colecciones del país. La especificidad de los endófitos va más allá de su capacidad de asociarse con las plantas; representa una diversidad funcional enzimática, propia de una adaptación al estilo de vida de las plantas (Knapp *et al.*, 2018). La experiencia de nuestro laboratorio sugiere que podemos encontrar multitud de endófitos, muchos de ellos también abundantes en algunos suelos. Una manera rápida de saber si tiene una posible relación con las raíces, es hacerlos crecer en medio convencional (PDA) y luego colocar semillas. Las semillas afines al hongo, logran germinar y enraizar en el medio de cultivo (Figura 1). De esta manera, detectaríamos una multitud de hongos afines a plantas cultivadas, en un país megadiverso como México. Posteriormente, se pueden inocular semillas y plántulas con los hongos seleccionados, en cuyo caso se obtendrían multitud de respuestas en planta. Al final del ciclo del cultivo, se podrá reaislar el hongo inoculado si posee una propiedad endófito (Figura 1) (J. Samaniego. Datos No publicados).

El modelo de interacciones benéficas de los organismos debería emularse entre todos los sectores interesados en esta alternativa. Los investigadores podrían intercambiar aislamientos, experiencias y apoyar modelos de colaboración regionales. Las empresas que reproducen microorganismos para control biológico y biofertilizantes podrían comercializarlos. Todo ello, en un marco que proteja los derechos de autoría. La finalidad última de la investigación es generar tecnología para el agricultor. El



Figure 1. Evaluation of endophytic fungi in germination of alfalfa (*Medicago sativa*) and watermelon (*Cucumis melo*) seeds in PDA media. A. Germination of the alfalfa and watermelon seeds on different fungi colonies. B. Germination of alfalfa on colonies of *Trichoderma* sp. in water-agar. C. Alfalfa seedlings on fungi colonies with root growth on the media. E. Germination of alfalfa seeds, without previous disinfection with NaOCl. F. Germination of disinfected seed.

Figura 1. Evaluación de hongos endofíticos en germinación de semillas de alfalfa (*Medicago sativa*) y melón (*Cucumis melo*) en medio PDA. A. Germinación de semillas de alfalfa y melón sobre diferentes colonias de hongos; B. Germinación de alfalfa junto a colonias de *Trichoderma* sp. en agua-agar; C. Plántulas de alfalfa sobre colonias de *Trichoderma* sp. en aparente interacción positiva; D. Plántulas de alfalfa sobre colonias del hongo con crecimiento radicular en el medio; E. Germinación de semillas de alfalfa, sin previa desinfección con NaOCl; F. Germinación de semilla desinfectada.

ACKNOWLEDGMENT

I thank Daniela Samaniego-Castruita (University of California San Diego/La Jolla Institute for Immunology), for her suggestions and revision to this manuscript.

LITERATURE CITED

- Bejarano González F (Ed.). 2018. Los plaguicidas altamente peligrosos en México. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, AC RAPAM. <https://www.rapam.org/wp-content/uploads/2017/09/Libro-Plaguicidas-Final-14-agst-2017sin-portada.pdf>
- Bi J, and Wang YF. 2020. The effect of the endosymbiont *Wolbachia* on the behavior of insect hosts. *Insect science* 27(5):846-858. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1744-7917.12731>
- Brunner-Mendoza C, Reyes-Montes, MDR, Moonjely S, Bidochka McJ, and Toriello C. 2019. A review on the genus *Metarhizium* as an entomopathogenic microbial biocontrol agent with emphasis on its use and utility in Mexico. *Biocontrol Science and Technology* 29(1): 83-102. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1531111>
- Chitnis VR, Suryanarayanan TS, Nataraja KN, Prasad SR, Oelmüller R, and Shaanker RU. 2020. Fungal Endophyte-Mediated Crop Improvement: The Way Ahead. *Frontiers in Plant Science* 11:Article 561007. <https://pdfs.semanticscholar.org/5960/ce0d67c3fe5291735fe7d87e7568cef64caf.pdf>
- Cotes AM, (Ed.). 2018. *Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros*. Vol. 1 y 2. Editorial AGROSAVIA. Mosquera, Colombia. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/33829>
- Druzhinina, I. 2017. Using mother nature to help clean up mother nature. *Scientia.global* 113: 93-96. <https://www.scientia.global/wp-content/uploads/2017/04/Irina-Druzhinina-single-pages.pdf>
- Eguarte LE, Aguirre-Liguori JA, Jardón-Barbolla L, Aguirre-Planter E, and Souza, V. 2013. Genómica de poblaciones: nada en Evolución va a tener sentido si no es a la luz de la genómica, y nada en genómica tendrá sentido si no es a la luz de la evolución. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 16(1): 42-56. <https://www.medigraphic.com/pdfs/revespciequibio/cqb-2013/cqb131e.pdf>
- Espinosa JC. 2019. *Aproximación teórica a la evolución de los endosimbiontes bacterianos de los áfidos*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Madrid España. <https://eprints.ucm.es/60084/1/T41866.pdf>
- García de León S y Mier T. 2010. Visión general de la producción y aplicación de bioplaguicidas en México. *Sociedades Rurales, Producción Y Medio Ambiente* 10 (20): 37-63. <https://biblat.unam.mx/hevila/dadesruralesproduccionymedioambiente/2010/vol10/no20/2.pdf>
- Geras'kin S, Oudalova A, Dikareva N, Spiridonov S, Hinton T, Chernonog E, and Garnier-Laplace J. 2011. Effects of

trabajo perseverante y cooperativo en investigación, suele tener como resultado un impacto económico. El entomopatógeno *Ophiocordyceps sinensis*, con propiedades adicionales en medicina, se cotiza en 1.2 millones de pesos por kilogramo beneficiando al sector científico e industrial (Li *et al.*, 2019).

La sostenibilidad tiene como objetivo mantener la salud humana, que permitiría enfrentar mejor esta y otras pandemias, mediante la producción de alimentos que fortalezcan el sistema inmunológico. Además, la producción de alimentos requeriría menos insumos o un mejor manejo de estos atenuando los estreses abióticos y bióticos, todo ello mediante la asociación de organismos benéficos a las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Daniela Samaniego-Castruita (Universidad de California en San Diego / Instituto La Jolla de Inmunología), por sus sugerencias y revisión de este manuscrito.

~~~~~ Fin de la versión en Español ~~~~~

- radioactive contamination on Scots pines in the remote period after the Chernobyl accident. *Ecotoxicology* 20: 1195-1208. <http://www.ecoradmod.narod.ru/rus/publication2/Geraskin2011.pdf>
- González-Salgado IL, Rivera-Navarro J, Padilla-Bernáldez J, y Gullón-Tosio P. 2021. Epidemocracia. Nadie está a salvo si no estamos todos a salvo. *Gaceta Sanitaria*. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.11.007>
- Gordon SP, Contreras-Moreira B, Woods DP, Des Marais DL, Burgess D, Shu S,.... and Vogel JP. 2017. Extensive gene content variation in the *Brachypodium distachyon* pan-genome correlates with population structure. *Nature Communications* 8 (1):1-13. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02292-8.pdf?origin=ppub>
- Guerra-Sierra, B. E. 2008. Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible. *Revista Tecnología En Marcha*, 21(1):191-201. [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/1352](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1352)
- Guzmán-Guzmán, P, Porras-Troncoso, MD, Olmedo-Monfil V, and Herrera-Estrella, A. 2019. *Trichoderma* species: versatile plant symbionts. *Phytopathology* 109(1): 6-16. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PHYTO-07-18-0218-RVW>



- Hemalatha BN, Venkatesan T, alali SK, and Reetha B. 2014. Distribution and characterization of microbial communities in *Chrysoperla zastrowi sillemi*, an important predator of sap sucking insect pests. African Journal of Microbiology Research 814:1492-1500. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6506>
- Hemalatha BN. 2015. Studies on characterization of endosymbionts of *Chrysoperla zastrowi sillemi* Esben Peterson and their role on the fitness attribute. PhD Thesis. University of Mysore, India. <http://hdl.handle.net/10603/62254>
- Hernández-Rosas F, García-Pacheco LA, Figueroa-Rodríguez, KA, Figueroa-Sandoval B, Salinas Ruiz J, Sangerman-Jarquín DM y Díaz-Sánchez EL. 2019. Análisis de las investigaciones sobre *Metarhizium anisopliae* en los últimos 40 años. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 22(3):155-166. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10nspe22/2007-0934-remexca-10-spe22-155-en.pdf>
- Horton R. 2020. Offline: COVID-19 is not a pandemic. Lancet, 396(10255), 874. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32000-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32000-6)
- Hu J, Zhou Y, Chen K, Li J, Wei Y, Wang Y,.... and Denton, MD. 2020. Large-scale *Trichoderma* diversity was associated with ecosystem, climate and geographic location. Environmental Microbiology 22(3):1011-1024. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14798>
- Kaur, T. 2020. Fungal Endophyte-Host Plant Interactions: Role in Sustainable Agriculture. Sustainable Crop Production 211. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92367>
- Knapp DG, Németh JB, Barry K, Hainaut, M., Henrissat, B, Johnson J,.... and Ohm RA. 2018. Comparative genomics provides insights into the lifestyle and reveals functional heterogeneity of dark septate endophytic fungi. Scientific reports 8(1):1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24686-4>
- Lata R, Chowdhury S, Gond SK, and White Jr JF. 2018. Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes. Letters in applied microbiology 66(4):268-276. <https://doi.org/10.1111/lam.12855>
- Li X, Liu Q, Li W, Li Q, Qian Z, Liu X, Dong C. 2019. A breakthrough in the artificial cultivation of Chinese cordyceps on a large-scale and its impact on science, the economy, and industry. Critical Review Biotechnology 39(2):181-191. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07388551.2018.1531820>
- Liu Y, Jin-Li CAO, Zou YN, Qiang-Sheng WU, and Kamil KUČA. 2020. *Piriformospora indica*: a root endophytic fungus and its roles in plants. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 48(1):1-13. <https://www.notulaeobotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/11761/8880>
- Martín-Moreno JM, Arenas A, Bengoa R, Borrell C, Franco M, García-Basteiro A,.... y Vives-Cases, C. 2021. Reflexiones sobre cómo evaluar y mejorar la respuesta a la pandemia de COVID-19. Gaceta Sanitaria. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.11.008>
- Mata-González R. 2020. Cambio Climático e Impacto Ambiental. Memoria XVI Congreso Nacional sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas. Durando, México. (En prensa). <https://congresorebiza.mx/>
- Mukhopadhyay AN, Shrestha SA and Mukherjee PK. 1992. Biological seed treatments for control of soil borne plant pathogens. Plant Protection Bulletin. FAO 40 3:21-30. [https://books.google.com.mx/books/about/FAO\\_Plant\\_Protection\\_Bulletin.html?id=XiZHp7LyolsC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.mx/books/about/FAO_Plant_Protection_Bulletin.html?id=XiZHp7LyolsC&redir_esc=y)
- Nair IJ, Sharma S, and Kaur R. 2020. Efficacy of the green lace wing, *Chrysoperla zastrowi sillemi* Esben-Peterson Neuroptera: Chrysopidae, against sucking pests of tomato: an appraisal under protected conditions. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 30(1):1-6. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00277-2>
- National Agricultural Innovation Project, Final Report 2014. An Initiative towards Innovative Agriculture. Indian Council of Agricultural Research. New Delhi, India. <https://naip.icar.gov.in/download/nai-final-reports.pdf>
- Pacheco Hernández, M, Reséndiz Martínez, J, and Arriola Padilla, V. J. 2019. Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: Una revisión. Revista mexicana de ciencias forestales 10(56):4-32. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.496>
- Polack, LA. 2008. Interacciones tritróficas involucradas en el control de plagas de cultivos hortícolas Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. Argentina. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/4388/Documento\\_completo\\_.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/4388/Documento_completo_.pdf?sequence=1)
- Poveda-Arias, J. 2019. Los microorganismos asociados a los insectos y su aplicación en la agricultura. Revista Digital Universitaria 20 (1): 1-15. <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a2>
- Rana KL, Kour D, Sheikh I, Dhiman A, Yadav N, Yadav AN, ... and Saxena AK. 2019. Endophytic fungi: biodiversity, ecological significance, and potential industrial applications. In Recent advancement in white biotechnology through fungi pp. 1-62. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_1)
- Redman RS, Sheehan KB, Stout RG, Rodriguez RJ, and Henson JM. 2002. Thermotolerance generated by plant/fungal symbiosis. Science 298(5598):1581-1581. <https://www.howplantswork.com/hotplants/PDF/Redman.pdf>
- Rodriguero, MS. 2013. *Wolbachia*, una pandemia con posibilidades. Revista de la Sociedad Entomológica Argentina 72(3):117-137. <https://www.redalyc.org/pdf/3220/322030024001.pdf>
- Rodriguez, RJ, Henson J, Van Volkenburgh E, Hoy M, Wright L, Beckwith F, Kim YO, and Redman RS. 2008. Stress tolerance in plants via habitat-adapted symbiosis. The ISME journal 24:404-416. <https://www.nature.com/articles/ismej2007106/>
- Samaniego-Gaxiola JA, Pedroza-Sandoval A, Bravo A, Sánchez JF, Peña-Chora G, Mendoza-Flores D, Chew-Madinaveitia Y y Gaytán-Mascorro A. 2019. Fumigación con ácidos acéticos y antimicrobianos para disminuir mortalidad de *Chrysoperla carnea* por infección indeterminada. Revista mexicana de ciencias agrícolas 10(5):973-986. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10n5/2007-0934-remexca-10-05-973-en.pdf>
- Samaniego-Gaxiola, J. A, Ramírez-Delgado, M, Pedroza-Sandoval, A, and Nava-Camberos, U. 2008. Asociación

- entre pudrición texana *Phymatotrichopsis omnivora* e insectos barrenadores del nogal *Carya illinoensis*. *Agricultura Técnica en México* 34:21-32. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v34n1/v34n1a3.pdf>
- SENASICA. 2020. <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/acciones-estrategicas-de-sanidad-vegetal>
- Sharma S, Kour D, Rana KL, Dhiman A, Thakur S, Thakur P,... and Yadav AN. 2019. *Trichoderma*: biodiversity, ecological significances, and industrial applications. In *Recent advancement in white biotechnology through fungi* pp. 85-120. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_3)
- Siddiquee S, Cheong E, Taslima K, Hossain K, and Hasan M. 2012. Separation and Identification of volatile compounds from liquid cultures of *Trichoderma harzianum* by GC-MS using three different capillary columns. *Journal of Chromatographic Science* 50:358-367. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123275901>
- Sugio A, Dubreuil G, Giron D, and Simon JC. 2015. Plant-insect interactions under bacterial influence: ecological implications and underlying mechanisms. *Journal of Experimental Botany* 66(2):467-478. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01312942/>
- Torres MS, White JF. 2010. Grass Endophyte-Mediated Plant Stress Tolerance: Alkaloids and Their Functions. In: Seckbach J, Grube M. eds *Symbioses and Stress. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, Vol. 17. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9449-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9449-0_24)
- Van der Valk, H. 2007. Review of the efficacy of *Metarhizium anisopliae* var. *acridum* against the desert locust. Desert Locust Technical Series. FAO, Rome. <http://www.fao.org/ag/locusts/common/ecg/1295/en/TS34e.pdf>
- Wang CH, Hou R, Wang M, He G, Li BG, and Pan RL. 2020. Effects of wet atmospheric nitrogen deposition on epiphytic lichens in the subtropical forests of Central China: Evaluation of the lichen food supply and quality of two endangered primates. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 190:110128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110128>
- Williams T, Arredondo-Bernal HC, and Rodríguez-del-Bosque LA. 2013. Biological pest control in Mexico. *Annual Review of Entomology*, 58:119-140. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120811-153552>
- Yan L, Zhao H, Zhao X, Xu X, Di Y, Jiang C,... and Jin M. 2018. Production of bioproducts by endophytic fungi: chemical ecology, biotechnological applications, bottlenecks, and solutions. *Applied Microbiology and Biotechnology* 102(15):6279-6298. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9101-7>
- Zimmermann, G Huger AM, and Kleespies RG. 2013. Occurrence and Prevalence of Insect Pathogens in Populations of the Codling Moth, *Cydia pomonella* L.: A Long-Term Diagnostic Survey. *Insects* 43:425-446. <https://doi.org/10.3390/insects4030425>