

Microbial genetic resources in food security to face COVID-19 pandemic

Recursos genéticos microbianos en la seguridad alimentaria ante la pandemia COVID-19

Lily Xochilt Zelaya-Molina, ¹Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Boulevard de la Biodiversidad # 400. Rancho Las Cruces. C.P. 47600. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. **Sergio de los Santos-Villalobos**, Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de febrero 818 Sur, Colonia Centro, C.P. 85000. Ciudad Obregón, Sonora. **Ismael Fernando Chávez-Díaz**^{1*} **Liliana Carolina Córdova-Albores**, Escuela de Agronomía, Universidad De La Salle Bajío, Avenida Universidad 602. Colonia Lomas del Campestre C.P. 37150, León, Guanajuato.
*Corresponding author: chavez.fernando@inifap.gob.mx; refzaid@hotmail.com.

Received: February 02, 2021.

Accepted: March 30, 2021.

Zelaya-Molina LX, de los Santos-Villalobos S, Chávez-Díaz IF and Córdova-Albores LC. 2021. Microbial genetic resources in food security to face COVID-19 pandemic. *Mexican Journal of Phytopathology* 39(4): 233-260.

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2021-7>

Abstract. COVID-19 has had an impact on the regional and worldwide agricultural value chain, jeopardizing food security. It is time to reassess the approach of the agri-food sector and to consider that the food supply and plant health, as agro-systemic services, must depend on strategies with a low impact on productive and environmental assets. One strategy is the use and optimization of microbial genetic resources (MGR) related to agro-ecosystems as a source of balance, functionality, productivity, inhibition of the impact of pests and pathogens, and contribution to the profitability of agri-food activity. It is necessary to strengthen

Resumen. La enfermedad COVID-19 ha impactado en la cadena de valor agrícola regional y mundial comprometiendo la seguridad alimentaria. Es momento de replantear el enfoque del sector agroalimentario y considerar que el abastecimiento de alimentos y la sanidad vegetal, como servicios agroecosistémicos, deben depender de estrategias de bajo impacto en los activos productivos y ambientales. Una estrategia es el empleo y optimización de recursos genéticos microbianos (RGM) asociados a los agroecosistemas como fuente de equilibrio, funcionalidad, productividad, inhibición del impacto de plagas y patógenos, y contribución a la rentabilidad de la actividad agroalimentaria. Es necesario potenciar y desarrollar sistemas agrícolas regionales que sean dinámicos, mitiguen daños ambientales y produzcan alimentos con características nutricionales y nutraceuticas que aseguren la salud humana. Las ciencias agrícolas están experimentando cambios de paradigmas científicos que beneficiarán el sector agroalimentario si

and develop regional agricultural systems that are dynamic, that mitigate damages to the environment and produce nutritional and nutraceutical foods that ensure human health. Agricultural sciences are undergoing changes in scientific paradigms that will benefit the agri-food sector if we are able to learn from the impacts of an extensive technological agriculture. Approaching agriculture from an agro-systemic point of view in which the crop-community is the functional biological unit of study and to preserve the MGR diversity are the greatest challenges to create sustainable and resilient strategies and technologies that contribute towards human health and help prevent risks during health crises such as the ongoing COVID-19 pandemic.

Key words: SARS-CoV-2, sustainable agriculture, holobiont, microbial diversity, biodiversity, conservation.

Agricultural production and the pandemic

Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, Director General of the World Health Organization (WHO), declared the COVID-19 pandemic, caused by the SARS-CoV-2 virus as official on March 11th, 2020. The whole world adopted social distancing as the main measure for the prevention of contagion, and the lifestyles of millions of people changed drastically (Cucinotta and Vanelli, 2020). The social and economic sectors were the most affected; however, the greatest challenge has been for the health and agri-food sectors, since they are the engine of a world that seems to have been put on hold (Haleem and Javaid, 2020). The COVID-19 disease currently jeopardizes food security, due to its impact on regional agricultural value chains, causing an imbalance between the demand and availability of food (FAO, 2020a). The situation

somos capaces de aprender de los impactos de una agricultura tecnológica extensiva. Abordar la agricultura desde una visión agroecosistémica, donde el cultivo-comunidad sea la unidad biológica funcional de estudio, y conservar la diversidad RGM, constituyen los grandes retos para generar estrategias y tecnologías sustentables y resilientes que contribuyan a la salud humana y coadyuven a la prevención de riesgos ante crisis sanitarias como la actual pandemia COVID-19.

Palabras clave: SARS-CoV-2, agricultura sostenible, holobionte, diversidad microbiana, biodiversidad, conservación

La producción agrícola y la pandemia

El Dr. Tedros Adhanom Ghebreyesus, Director General de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), declaró oficial la pandemia COVID-19, causada por el virus SARS-CoV-2, el 11 de marzo de 2020. El mundo entero adoptó el distanciamiento social como medida principal de prevención de contagio y el estilo de vida de millones de personas cambió drásticamente (Cucinotta y Vanelli, 2020). El sector social y económico fueron los principales afectados; sin embargo, el mayor reto ha sido para los sectores de salud y agroalimentario ya que son el motor de un mundo que parece entró en pausa (Haleem y Javaid, 2020). La enfermedad COVID-19 actualmente compromete la seguridad alimentaria mundial al impactar sobre las cadenas de valor agrícola regionales, causando un desbalance entre demanda y disponibilidad de alimentos (FAO, 2020a). La situación se agrava si consideramos que el escenario del sistema agroalimentario actual no es sostenible y su debilitamiento constituye un factor de riesgo *per se* y respecto a la salud de los habitantes del planeta (FAO *et al.*, 2020).

worsens if we consider that the current agri-food system scenario is not sustainable and its weakening is a risk factor *per se* and in regard to the health of the world's inhabitants (FAO *et al.*, 2020).

Currently, agri-food production is based on the excessive use of synthetic and/or biologically manipulated inputs (Chávez-Díaz *et al.*, 2020; FAO, 2020b; FAO *et al.*, 2020; Francis, 2020; Siche, 2020), producing intense socioeconomic and environmental impacts that jeopardize food security and self-sufficiency:

- Imbalance in the microbial and plant biodiversity in agro-ecosystems, making food production difficult.
- Generation of resistance in phytopathogens, pests and weeds, and in human pathogens, which limit the yields of crops and puts human health at risk.
- Limitation in the mitigation and resilience to climate change.
- Continuous increase of the cost of agricultural inputs that directly affect the costs of fresh and processed foods, reducing the purchasing power of the world's population.
- Increase in the economic and social polarization in detriment to small-scale agriculture.
- Deficient diets with inadequate foods or with traces of agrochemicals (food innocuousness), putting several sectors of the population at risk.

The ongoing pandemic forces us to reflect upon the lifestyle humanity has adapted and the way in which we relate to nature and agro-ecosystems, as well as to implement alternatives that lead to environmental and social well-being. This document discusses a reassessment of the agri-food sector in the light of the world COVID-19 health crisis, based on the premise of food provision as an agro-ecosystemic service. It centers on plant

Actualmente la producción agroalimentaria se basa en la utilización excesiva de insumos sintéticos y/o biológicamente manipulados (Chávez-Díaz *et al.*, 2020; FAO, 2020b; FAO *et al.*, 2020; Francis, 2020; Siche, 2020), ocasionando fuertes impactos socio-económicos y ambientales que comprometen la seguridad alimentaria y autosuficiencia:

- Desbalance en la biodiversidad microbiana y vegetal en agroecosistemas, dificultando la producción de alimentos.
- Generación de resistencia en fitopatógenos, plagas y malezas, y en patógenos humanos, que limitan el rendimiento de los cultivos y pone en riesgo la salud humana.
- Limitación en la mitigación y resiliencia al cambio climático.
- Incremento continuo del costo de insumos agrícolas que directamente afectan el precio de alimentos frescos y procesados dañando el poder adquisitivo de la población mundial.
- Incremento en la polarización económica-social con detrimento de la agricultura de pequeña escala.
- Consumo de dietas deficientes, de alimentos inadecuados o con rastros de agroquímicos (inocuidad alimentaria), poniendo en riesgo a diversos sectores de la población.

La presente pandemia, nos obliga a reflexionar sobre el estilo de vida que ha adoptado la humanidad y la forma como nos relacionamos con la naturaleza y agroecosistemas e implementar alternativas que generen el bienestar ambiental y social. El presente documento discute un replanteamiento del sector agroalimentario frente a la crisis mundial de salud por COVID-19, partiendo de la premisa del abastecimiento de alimentos como un servicio agroecosistémico. Se centra en la fitosanidad, uno de las áreas tecnológica-científica fundamental en

health, one of the main technological and scientific areas in the wholesome production of food, and on the potential of microbial genetic resources (MGR) applied to biological control as a source of balance, functionality, productivity and profitability of agri-food activities.

The biological component in agri-food production

Agroecosystems, artificial ecosystems closely associated to the biological activity of the soil-related microbiota (Sahu *et al.*, 2017), and to plant microbiome, provide ecosystemic services such as pest regulation, pollination, nutrient cycling, climate regulation, soil conservation, supplying water, and the production of foods and materials, by means of a complex network of interactions between microorganisms, plants, animals, environmental conditions and agricultural practices (Power, 2010). This process, known as the functionality of agro-ecosystems, depends directly on the soil biodiversity (Saleem *et al.*, 2019) and ensures that, for each type of crop and its specific conditions, there is a key community of microorganisms in charge of the functionality of the agro-ecosystem. This is conceived as a microbiome (Whipps *et al.*, 1988). Currently, from an agri-food point of view, a microbiome is the set of microorganisms, their functional genetic material, ecological niches and the product of its interactions in an agri-food habitat, under certain conditions in a specific moment; understanding, however, that the ‘moment’ is a product of the complex relations established in time. The microbiomes have a close relation with the biotope that, under the influence of abiotic factors throughout time, result in a functional biological unit, or a holobiont (Berg *et al.*, 2020; Hassani *et al.*, 2018). Holobionts have co-evolved with their environment throughout

la producción sana de alimentos, y en el potencial de recursos genéticos microbianos (RGM) aplicados al control biológico como fuente de equilibrio, funcionalidad, productividad y rentabilidad de la actividad agroalimentaria.

El componente biológico en la producción agroalimentaria

Los agroecosistemas, ecosistemas artificiales estrechamente ligados a la actividad biológica de la microbiota asociada al suelo (Sahu *et al.*, 2017), y al microbioma de la planta, proporcionan servicios ecosistémicos como la regulación de plagas, polinización, ciclaje de nutrientes, regulación del clima, conservación del suelo, provisión de agua, y finalmente la generación de alimentos y materiales, mediante una red compleja de interacciones entre microorganismos, plantas, animales, condiciones ambientales y prácticas agrícolas (Power, 2010). Este proceso, conocido como funcionalidad de los agroecosistemas, depende directamente de la biodiversidad del suelo (Saleem *et al.*, 2019) y asegura que, para cada tipo de cultivo, y sus condiciones específicas, existe una comunidad clave de microorganismos que se encargan de la funcionalidad del agroecosistema. Esto es concebido como un microbioma (Whipps *et al.*, 1988). Actualmente, desde un punto de vista agroalimentario, un microbioma es el conjunto de microorganismos, su material genético funcional, sus nichos ecológicos, y el producto de sus interacciones en un hábitat agrícola-alimentario, bajo condiciones determinadas en un momento específico; entendiendo, sin embargo, que ese ‘momento’ es producto de complejas relaciones establecidas a lo largo del tiempo. Los microbiomas tienen una estrecha interacción con el biotopo, que, bajo la influencia de los factores abióticos a través del tiempo, resultan en una unidad biológica funcional, es decir, un holobionte (Berg

time, adapting to adverse weather conditions and to pathogens, therefore their study represents a source of opportunities to achieve food security, mitigate and adapt to climate change and the control of diseases (Altieri and Nicholls, 2020; Dhar and Mohanty, 2020; Simon *et al.*, 2019; Thomashow *et al.*, 2018). However, a holobiont may be severely affected by agrochemicals and pesticides such as bromomethane (a banned biocide), glyphosate, carbamates and others. In this way, the productivity of the agri-food sector and the preservation of the means of production depend on the fine balance between the characteristics of the crop in association with its microbiome, based on the environmental conditions and the management of the agro-ecosystem (e.g., cultural practices, varieties used, etc.).

Human well-being and the microbial diversity in agro-ecosystems

Scientific evidence from the past 30 years correlates health conditions and diseases of human, animals and plants, and environmental deterioration with their respective microbial diversity (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020; Trivedi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2019; Wei *et al.*, 2019; Park, 2018; Singh and Trivedi, 2017; Wall *et al.*, 2015; Cox *et al.*, 2013; Berendsen *et al.*, 2012; Heller and Zavaleta 2009; Turnbaugh *et al.*, 2007). The microbial diversity of agro-ecosystems has a direct impact on human health, since it is implied in multiple biological and productive processes and factors (Figure 1):

- It increases agricultural yield. It regulates plant growth factors, facilitates the acquisition of nutrients and favors resilience to adverse environmental conditions (Saleem *et al.*, 2019).
- It promotes plant health by regulating plant pathogen populations and stimulating the

et al., 2020; Hassani *et al.*, 2018). Los holobiontes han co-evolucionado con su ambiente a través del tiempo, adaptándose a condiciones climáticas adversas y a patógenos, por lo que su estudio representa una fuente de oportunidades para lograr la seguridad agroalimentaria, la mitigación y adaptación al cambio climático y el control de enfermedades (Altieri y Nicholls, 2020; Dhar y Mohanty, 2020; Simon *et al.*, 2019; Thomashow *et al.*, 2018). Sin embargo un holobionte puede ser severamente afectado por agroquímicos y pesticidas como el bromuro de metilo (un biocida ya prohibido), glifosato, carbamatos y otros. De esta manera la productividad del sector agroalimentario y la preservación de los medios de producción dependen del delicado equilibrio entre las características del cultivo en asociación con su microbioma, en función de las condiciones ambientales y el manejo del agroecosistema (p.e., prácticas culturales, variedades empleadas, etc.).

Bienestar humano y la diversidad microbiana en agroecosistemas

Las evidencias científicas de los últimos 30 años correlacionan los estados de salud y enfermedades humanas, animales, vegetales y el deterioro ambiental, con su respectiva diversidad microbiana (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020; Trivedi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2019; Wei *et al.*, 2019; Park, 2018; Singh y Trivedi, 2017; Wall *et al.*, 2015; Cox *et al.*, 2013; Berendsen *et al.*, 2012; Heller y Zavaleta 2009; Turnbaugh *et al.*, 2007).

La diversidad microbiana de los agroecosistemas tiene un impacto directo sobre la salud humana al implicarse en múltiples procesos y factores biológicos y productivos (Figura 1):

- Incrementa el rendimiento agrícola. Regula factores de crecimiento vegetal, facilita la adquisición

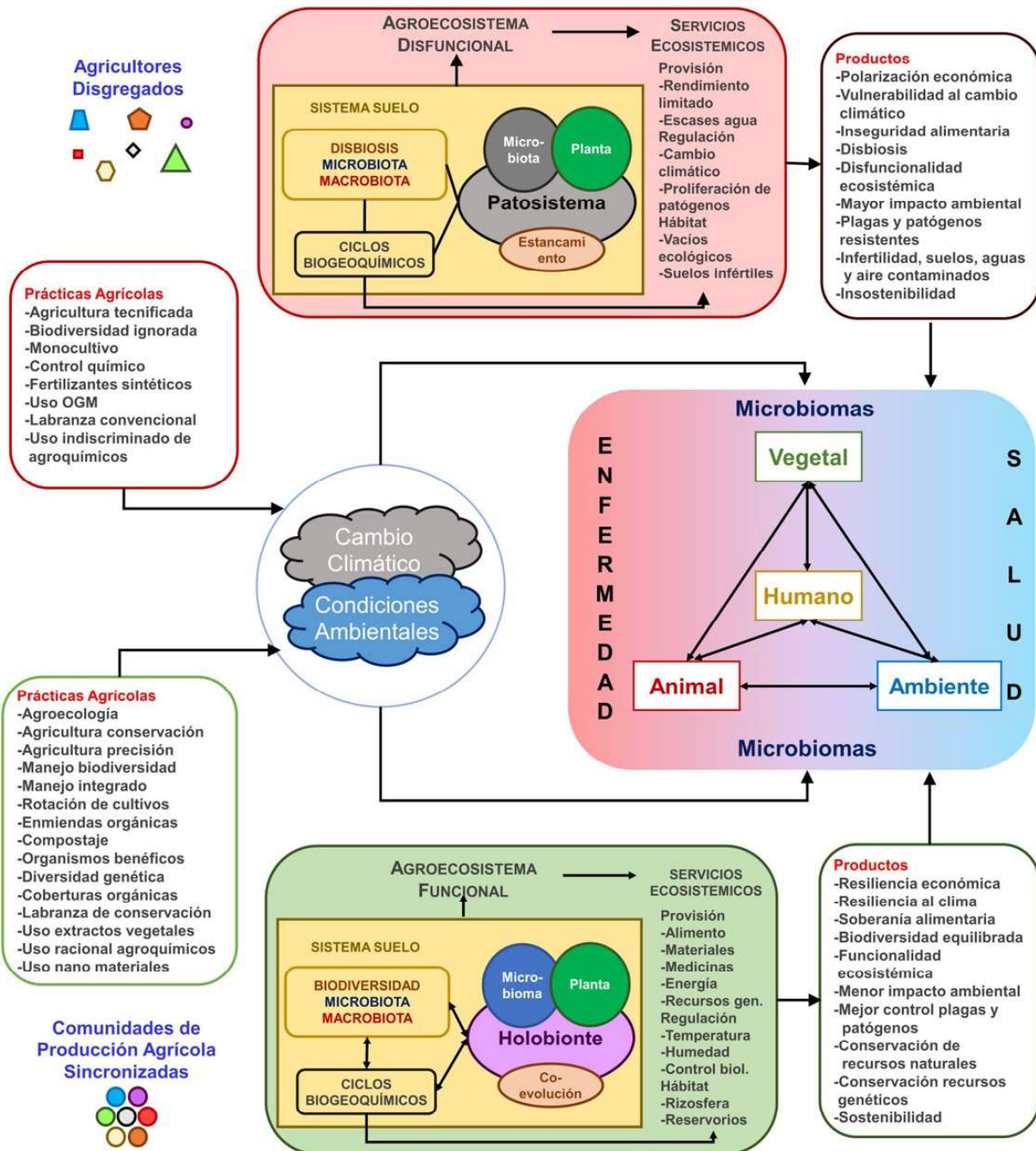


Figura 1. Impacto de biodiversidad y agricultura sostenible sobre la salud.
Figure 1. Impact of biodiversity and sustainable agriculture on human health.

- defense system of plants (Trivedi *et al.*, 2020).
- It promotes the functionality of agro-ecosystems by improving the efficiency of nutrient cycles (Griebler and Avramov, 2015).
 - It conditions, improves and preserves the productive capacity and the functionality of soils (Saleem *et al.*, 2019; Wagg *et al.*, 2014).
 - Participating in the retention of water and having a direct bearing on the quality of soils, water and air for its ability to biodegrade toxic compounds (Subedi *et al.*, 2020; Wall *et al.*, 2015).
 - Limiting the microbial load or the proliferation of harmful pathogens to humans and animals in fresh foods. It can be established as a part of the gut microbiota, helping to modulate immune and inflammatory responses (Belkaid and Hand, 2014).
- It has an impact on the nutritional and nutraceutical contents of foods (Chandra *et al.*, 2020).
- It constitutes a source of molecules of biotechnological, pharmaceutical and industrial interest (Rana *et al.*, 2019).

The increase in the microbial diversity in agro-ecosystems related to yield and plant health (Singh *et al.*, 2020; Trivedi *et al.*, 2020), to the beneficial impact of probiotics (Infusino *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2019; Cox *et al.*, 2013) and of foods with adequate nutritional and nutraceutical characteristics for human health (Mercado-Mercado *et al.*, 2020; Ramírez-Vega *et al.*, 2020; Stanisavljevic *et al.*, 2020) are strategies that can translate into resilience and stability for the prevention of diseases, and even against unfavorable contingencies such as the ongoing pandemic caused by the SARS-CoV-2 virus. Age, gender, chronic diseases, medications, and lifestyle are some of the risk factors for the state of COVID-19

- de nutrientes y favorece la resiliencia ante condiciones ambientales adversas (Saleem *et al.*, 2019).
- Promueve la salud vegetal al regular poblaciones de fitopatógenos y estimular el sistema de defensas de las plantas (Trivedi *et al.*, 2020).
 - Promueve la funcionalidad de agroecosistemas mejorando la eficiencia del ciclo de nutrientes (Griebler y Avramov, 2015).
 - Acondiciona, mejora y conserva la capacidad productiva y la funcionalidad de los suelos (Saleem *et al.*, 2019; Wagg *et al.*, 2014).
 - Participar en la retención de agua e incide directamente en calidad de suelos, agua y aire por su capacidad de biodegradar compuestos tóxicos (Subedi *et al.*, 2020; Wall *et al.*, 2015).
 - Limita en alimentos frescos la carga microbiana o proliferación de patógenos dañinos para humanos y animales. Se puede establecer como parte de la microbiota intestinal ayudando a modular respuestas inmune e inflamatorias (Belkaid y Hand, 2014).
 - Incide en la calidad nutricional y contenido nutracéutico de alimentos (Chandra *et al.*, 2020).
 - Constituye una fuente de moléculas de interés biotecnológico, farmacéutico e industrial (Rana *et al.*, 2019).

El incremento de la diversidad microbiana en los agroecosistemas asociado al rendimiento y salud vegetal (Singh *et al.*, 2020; Trivedi *et al.*, 2020), al impacto benéfico de probióticos (Infusino *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2019; Cox *et al.*, 2013) y de alimentos con buenas características nutricionales y nutracéuticas sobre la salud humana (Mercado-Mercado *et al.*, 2020; Ramírez-Vega *et al.*, 2020; Stanisavljevic *et al.*, 2020), son estrategias que pueden traducirse en resiliencia y estabilidad para la prevención de enfermedades e incluso ante eventualidades desfavorables como la actual

to become serious (Chidambaram *et al.*, 2020). The nutritional state of people, derived from diets based on wholesome, quality foods along with nutritional supplements have been considered crucial in clinical responses to COVID-19, since they have a direct effect on the modulation of the immune system and inflammatory responses, weakening the impacts of the disease (Aman and Masood, 2020; Dhar and Mohanty, 2020; Infusino *et al.*, 2020; Rishi *et al.*, 2020). In this context, and in the light of the implications of chronic cardiovascular and metabolic diseases on the clinical seriousness of COVID-19, the National Public Health Institute, appointed by the Mexican Secretariat of Health, managed to promote the labelling of foods with a regulation that became effective on October 1st, 2020, as a strategy to promote healthy eating (Editor's note). It is therefore unquestionable that the agri-food sector and the production of foods play an essential part in human health, in preventing diseases and the mitigation of health emergencies such as the ongoing COVID-19 pandemic.

Dysbiosis in the technified agricultural model

Dysbiosis is a state in which microbiota is unbalanced, the key niches are not covered and the complex network of interactions of the agricultural ecosystem is not functional, leading to a state of illness (Olesen and Alm, 2016). In this context, technified agri-food production, based on the implementation of synthetic inputs to eliminate plant pathogens, has made the situation worse since, along with pest organisms, it also eliminates or affects the beneficial microbiota, and in many cases, it produces resistance in microorganisms it intends to eliminate (Thanner *et al.*, 2016). This strong disruption contributes to mutagenic processes in the microorganisms, which contributes, in some environmental conditions, to their abrupt

pandemia causada por el virus SARS-CoV-2. Se ha declarado que factores como la edad, género, enfermedades crónicas, la medicación y el estilo de vida de los individuos, entre otros, son factores de riesgo para el desarrollo de un estado de gravedad ante COVID-19 (Chidambaram *et al.*, 2020). Se ha establecido que el estado nutricional de las personas, derivado de dietas basadas en alimentos sanos y de calidad complementadas con suplementos alimenticios, ha sido fundamental en las respuestas clínicas ante COVID-19, ya que estos inciden directamente en la modulación de las respuestas del sistema inmune e inflamatoria atenuando de los impactos de la enfermedad (Aman y Masood, 2020; Dhar y Mohanty, 2020; Infusino *et al.*, 2020; Rishi *et al.*, 2020). En este contexto, y ante la implicación de enfermedades metabólicas y cardiovasculares crónicas en la gravedad clínica del COVID-19, el Instituto Nacional de Salud Pública, adscrita a la Secretaría de Salud de México logró promover el etiquetado de alimentos con una normatividad que entró en vigor el 1 de octubre 2020 como una estrategia para fomentar el consumo de alimentos saludables (Nota del Editor). Así, es incuestionable que el sector agroalimentario y la producción de alimentos de calidad tiene un rol esencial en la salud humana, la prevención de enfermedades y la mitigación de emergencias sanitarias como la actual pandemia COVID-19.

Disbiosis en el modelo agrícola tecnificado

La disbiosis es un estado en el que la microbiota está en desequilibrio, no se cubren los nichos clave, y no es funcional la compleja red de interacciones del ecosistema agrícola, por lo que se conduce al estado de enfermedad (Olesen y Alm, 2016). En este contexto, el sistema de producción agroalimentario tecnificado, basado en la implementación de insumos sintéticos para la eliminación de fitopatógenos,

or explosive increase, leading to an environmental imbalance (Figure 2).

Hosts and microorganisms have coevolved in time to reach highly specialized symbiotic relations. Both symbionts, immersed in the evolutionary race, have developed “collaborative” or defense mechanisms (hosts) and mechanisms that help them adapt (microorganisms) as mutualists or pathogens (Hassani *et al.*, 2018; Matveeva *et al.*, 2018). This coevolution is limited or strengthened by environmental and anthropogenic conditions, and it has a considerable effect on the balance between populations with a higher degree of selective pressure. In this way, hosts, microorganisms and other living beings related to the ecological niche are subjected to a continuous adaptation, necessary to define their role in the agro-ecosystem (Thrall *et al.*, 2011) (Figure 2). The main element of the process of coevolution is genetic reciprocity; i.e., when an organism develops a trait as an adaptive response towards a factor that affects its biological aptitude, the biological counterpart will respond by generating another trait or traits which will allow them to adapt to the new trait developed by the first organism, and so on (McDonald, 2004). The generation of these traits or phenotypes is ruled by different evolutionary forces (Zhan, 2016; McDonald, 2004), thus hosts, microorganisms and other organisms related to agricultural systems coevolve, adapting to their surroundings if anthropomorphic action guarantees time as a factor of evolution. Under conditions of biodiversity and ecological balance, for every trait generated, other traits are produced which weaken it and a balance or state of health can be maintained. Under conditions of dysbiosis, such as the ones presented in a technified agricultural system, there are ecological gaps (e.g., those caused by agrochemicals), which cause the survival of a small group of individuals, which find ways to feed themselves, eventually

ha agravado la situación, ya que además de eliminar los organismos plaga también elimina o afecta la microbiota benéfica, y en muchos de los casos genera resistencia en aquellos microorganismos que pretende eliminar (Thanner *et al.*, 2016). Esta fuerte perturbación contribuye a procesos mutagénicos en los microorganismos, lo cual contribuye a que en algunas condiciones ambientales se incrementen de manera abrupta o explosiva originando un desbalance ecológico (Figura 2).

Hospederos y microorganismos han co-evolucionado a través del tiempo hasta establecer relaciones simbióticas altamente especializadas. Ambos simbioses, inmersos en la carrera evolutiva han desarrollado, por parte de los hospederos, mecanismos ‘colaborativos’ o de defensa, y por parte de los microorganismos mecanismos que les permiten adaptarse como mutualistas o como patógenos (Hassani *et al.*, 2018; Matveeva *et al.*, 2018). Esta coevolución esta limitada o potencializada por las condiciones ambientales y antropogénicas, y afectan notablemente el equilibrio entre las poblaciones mediante un mayor grado de presión selectiva. De esta manera, hospederos, microorganismos y otros seres vivos asociados al nicho ecológico estan sujetos a una adaptación continua necesaria para su definir su rol dentro del agroecosistema (Thrall *et al.*, 2011) (Figura 2). El proceso de coevolución tiene como elemento fundamental la reciprocidad genética; es decir, que cuando un organismo desarrolla un caracter como respuesta adaptativa hacia un factor que afecta su aptitud biológica, la contraparte biológica responderá generando otro carácter(es) que les permitirán adaptarse al nuevo caracter desarrollado por el primer organismo y así sucesivamente (McDonald, 2004). La generación de estos caracteres o fenotipos se rige por diferentes fuerzas evolutivas (Zhan, 2016; McDonald, 2004); así hospederos, microorganismos y otros organismos asociados a los sistemas agrícolas co-evolucionan

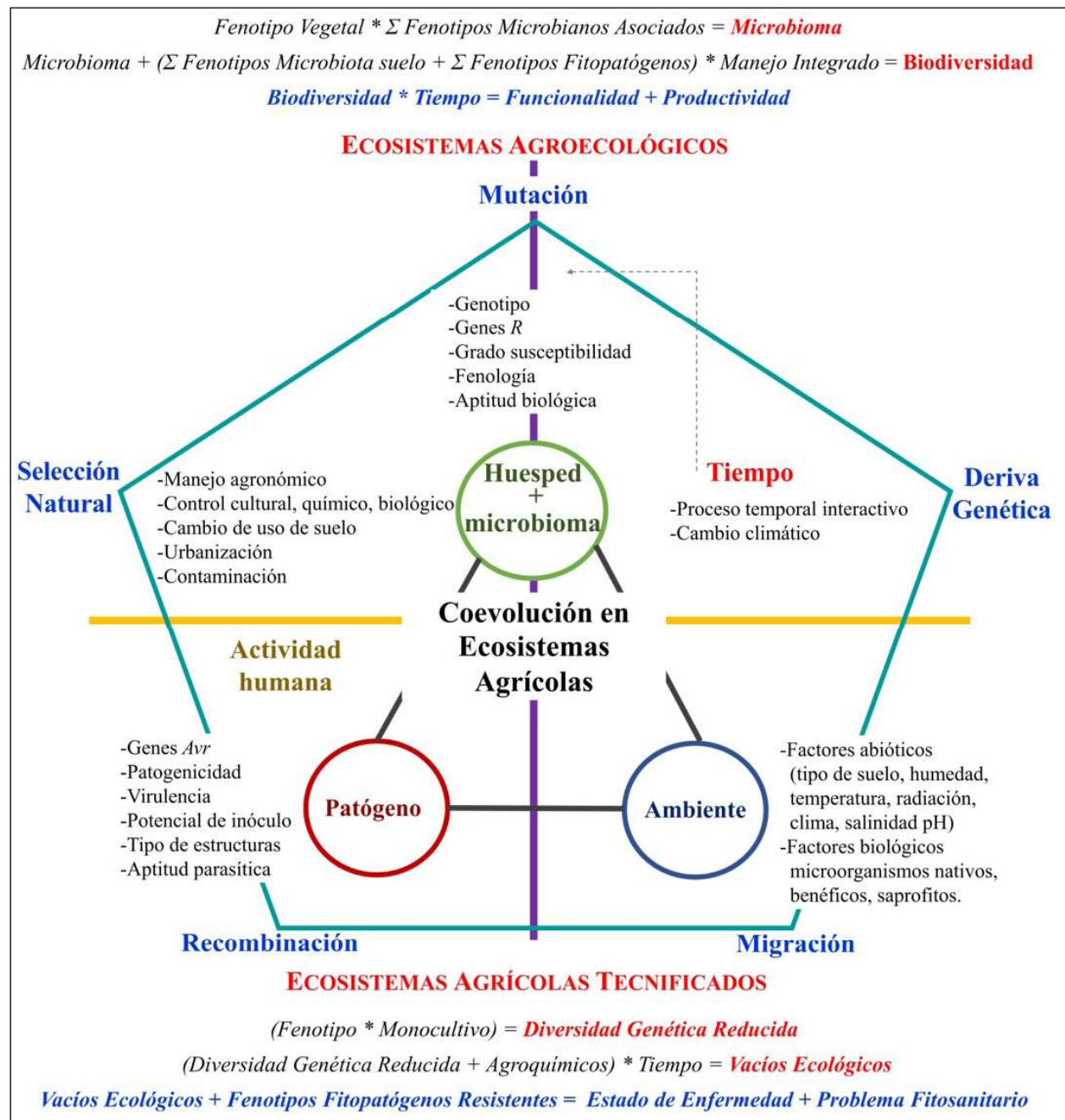


Figure 2. Effects of the co-evolution in the agroecosystems on the states of biodiversity and of dysbiosis. Figure produced by the author, based on the schemes by Zhan (2016) and Agrios (2005).

Figura 2. Efectos de la co-evolución en los agroecosistemas en estados de biodiversidad y de disbiosis. Figura de creación propia basada en los esquemas de Zhan (2016) y Agrios (2005).

leading to a state of imbalance or state of disease (Figure 2). In addition, cultural practices and the accelerated biological cycles of technified agriculture, along with the impact of urbanization, pollution and climate change on it exert great selective pressure on certain groups of beneficial organisms, making their establishment difficult in both micro and macroenvironments (Figure 2) (Tooker *et al.*, 2020). When analyzing the technified agri-food sector under this perspective, it is paradoxical to ask why there are currently human, animal and plant pathogens that are resistant to multiple factors, which become more and more difficult to control with every production cycle (Tooker *et al.*, 2020; Brown and Tillier, 2011). It is necessary to distinguish between technified productive systems, generally extensive monocultures, some of which have transgenic varieties (e.g. glyphosate-resistant soybeans or maize that has become pest-resistant due to the use of gene Bt) and traditional, subsistence or organic ones, which have a lower or null impact on soil and plant microbial systems (Editor's note).

Agri-food production models for nutrition and health

Since the so-called Green Revolution, agriculture has obtained higher yields using techniques that cause an economic and social imbalance (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). Production yield has increased using water technologies, nutrients, weed and pathogen control, and the use of varieties that are generally resistant to biotic and abiotic factors. However, productivity and the development of agriculture to guarantee world food security (Ecker *et al.*, 2011) forces us to search for productive models and technologies based on the use of alternatives, which not only maintain the balance of the microbiota of the agrosystem, but also increase crop yields, inhibit the growth of

adaptándose a su medio, sí la acción antropomórfica garantiza el tiempo como factor de evolución. En condiciones de biodiversidad y equilibrio ecológico, por cada carácter generado, se generan otros caracteres que lo atenuan y pueden mantenerse un equilibrio, un estado de salud. En condiciones de disbiosis, como las que se presentan en un sistema agrícola tecnificado, existen vacíos ecológicos (p.e., los ocasionados por los agroquímicos), que ocasionan la sobrevivencia de un pequeño grupo de individuos, los cuales encontrarán formas de alimentarse y que eventualmente conducen a un estado de desequilibrio o estado de enfermedad (Figura 2). Además, las prácticas culturales y los ciclos biológicos acelerados de la agricultura tecnificada, y el impacto de la urbanización, contaminación y cambio climático sobre esta, ejercen una fuerte presión selectiva sobre ciertos grupos de organismos benéficos, dificultando su establecimiento a nivel micro y macroambiente (Figura 2) (Tooker *et al.*, 2020). Al analizar bajo este punto de vista al sector agroalimentario tecnificado, resulta paradójico cuestionar porque actualmente se encuentran patógenos de humanos, animales y plantas resistentes a múltiples factores, que ciclo con ciclo productivo resultan más difíciles de controlar (Tooker *et al.*, 2020; Brown y Tillier, 2011). Es necesario diferenciar los sistemas productivos tecnificados, generalmente monocultivos extensivos, algunos con variedades transgénicas (p.e. de soya resistente al glifosato o el maíz resistentes a plagas mediante el gen Bt) de aquellos tradicionales, subsistencia u orgánicos, los cuales tienen un menor o nulo impacto en los sistemas microbianos del suelo y vegetal (Nota del Editor).

Modelos de producción agroalimentaria para la nutrición y la salud

A partir de la llamada revolución verde, la agricultura ha obtenido mayores rendimientos utilizando

pests and diseases in plants, allow the conservation of natural productive assets, contribute to caring for the environment and benefit humanity from a comprehensive scheme, including respect for the productive knowledge and cultural values. These models include organic agriculture, synchronous agricultural production, polyculture or mixed crop systems, minimal tilling, no tilling, and the use of composting technology, the improvement of soils with beneficial microorganisms, biopesticides, nanoparticles or plant extracts, and others (Figure 2).

Synchronic farming communities offer a better management of resources, the conservation of means of production and the environment, and they are economically and socially responsible, since they provide local and international distribution chains with stability and resilience (Marsden and Smith, 2005). The pragmatic application of this approach is represented in rural cooperatives with variations, depending on the productive philosophy.

Organic agriculture avoids the use of synthetic inputs and is based mainly on crop rotations, the use of animal manure (e.g., chicken manure, bovine manure, etc.) and crop residues as soil improvement and nutrient-mobilizing and plant-protecting biological systems (Patle *et al.*, 2020).

Conventional tilling modifies the structure of the soil surface and the continuity of porous space and reduces the content of organic matter, therefore it drastically reduces microbiota related to the agricultural ecosystem (Alonso-Báez *et al.*, 2011). Other types of tilling have been evaluated to understand the benefits they provide to the stability of the soil microbiota; particularly minimum tilling, which maintains a greater richness and uniformity of the microbial community, as well as a functional diversity of microorganisms involved in biogeochemical cycles (Legrand *et al.*, 2018).

Composts are organic amendment that stimulate microbiological process for the decomposition of

técnicas que rompen el equilibrio de los agrosistemas y que provocan un desvalance económico y social (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). El rendimiento productivo se ha incrementado mediante tecnologías del agua, nutrientes, control de malezas y fitopatógenos, y empleo de variedades generalmente resistentes a factores bióticos y abióticos. Sin embargo, la productividad y desarrollo de la agricultura para garantizar la seguridad alimentaria mundial (Ecker *et al.*, 2011), obliga a buscar modelos productivos y tecnologías basadas en el empleo de alternativas, que además de mantener el equilibrio de la microbiota del agrosistema, incrementen el rendimiento de los cultivos, inhiban el crecimiento de plagas y enfermedades vegetales, permitan la conservación de activos productivos naturales, contribuyan el cuidado del ambiente y beneficien a la humanidad desde un esquema integral, incluyendo el respeto a los saberes y valores culturales productivos. Dentro de estos modelos, destacan la agricultura orgánica, producción agrícola sincrónica, sistemas de policultivo o cultivos mixtos, labranza mínima, labranza cero, y el empleo de tecnologías de composteo, mejora de suelos con microorganismos benéficos, biopesticidas, nanopartículas o extractos vegetales, entre otras (Figura 2).

Las comunidades de producción agrícola sincrónicas, permiten tener un mejor manejo de los recursos, la conservación de los medios de producción y el ambiente, son económica y socialmente responsables al aportar estabilidad y resiliencia a las cadenas de distribución local e internacional (Marsden y Smith, 2005). La aplicación pragmática de este enfoque está representado en cooperativas de producción rural, con variantes según la filosofía productiva.

La agricultura orgánica evita el uso de insumos sintéticos y se basa principalmente en rotaciones de cultivos; uso de abonos de animales (p.e. gallinaza, bobinaza) y residuos de cultivos como mejoradores de suelo y sistemas biológicos de movilización

organic matter when used as a source of carbon and energy. The main benefits of carbon are the supply of nutrients, carbon sequestration, the induction of pest and pathogen suppressiveness, the improvement of soil structure, biodiversity, retention of soil moisture and reduction of soil erosion, and the increase of enzyme activity and microbial biomass, all of which contributes towards the increase of crop yields (Martínez-Blanco *et al.*, 2013). Regarding the use of secondary metabolites and nanoparticles as biological control products, there is imprecise or contrasting information on the effect of these products on the composition of microbiota related to the soil. However, one can assume that they exert some type of modification with a still unevaluated scope.

The integration of strategies is a logical alternative, but it requires the scientific backup to optimize the cost-benefit. The combination of conservation agriculture, bioproducts, composts, nanoparticles or plant extracts under an organic agriculture model has displayed promising effects. The study, validation and implementation of the combination of several alternative techniques in agricultural production is a field of action that can be developed to generate a sustainable form of agriculture, considering the nutritional and health needs of the population. However, public research planning and investment policies must foster technological development for sustainable agriculture, that is, creating or optimizing dynamic regional agricultural systems that mitigate or eliminate environmental damages related to technified agriculture and that prioritize the production of sufficient food with nutritional and nutraceutical characteristics that ensure human health (Goicochea and Antolín, 2017). The purpose is to position agriculture within a holistic context and recover its humanistic condition (Horrigan *et al.*, 2002). However, it is worth acknowledging

de nutrientes y protección de plantas (Patle *et al.*, 2020).

La labranza convencional es una práctica que modifica la estructura de la capa superficial del suelo, la continuidad del espacio poroso y reduce el contenido de materia orgánica, por lo que disminuye drásticamente la microbiota asociada al ecosistema agrícola (Alonso-Báez *et al.*, 2011). Otros tipos de labranza se han evaluado para conocer los beneficios que aportan a la estabilidad de la microbiota del suelo; específicamente la labranza mínima, la cual mantiene una mayor riqueza y uniformidad de la comunidad microbiana, así como diversidad funcional de microorganismos involucrados en ciclos biogeoquímicos (Legrand *et al.*, 2018).

Las compostas son enmiendas orgánicas que estimulan procesos microbiológicos para la descomposición de materia orgánica mediante su empleo como fuente de carbono y energía. Los principales beneficios de las compostas son el suministro de nutrientes, secuestro de carbono, inducción de supresividad de plagas y patógenos, mejora de la estructura del suelo, biodiversidad, retención de humedad del suelo y disminución de la erosión del suelo, e incremento en la actividad enzimática y biomasa microbiana, todo lo cual contribuye al incremento del rendimiento de cultivos (Martínez-Blanco *et al.*, 2013). En cuanto al empleo de metabolitos secundarios y nanopartículas como productos de control biológico, existe información imprecisa o contrastante sobre el efecto de estos productos en la composición microbiana asociada al suelo. Sin embargo, se puede suponer que ejercen algún tipo de modificación cuyo alcance no se ha evaluado.

La integración de estrategias es una alternativa lógica, pero requiere el soporte científico que permita optimizar el beneficio-coste. La combinación de labranza de conservación, bioproductos, compostas, nanopartículas o extractos vegetales bajo

the great political, governmental and geoeconomic challenges to be overcome on a global, national and local scale, for both the design and implementation of a more sustainable agri-food development (Antle and Ray, 2020).

Microbial genetic resources for a sustainable agriculture

One out of every nine people in the world (820 million) suffers from chronic starvation and over 2 million suffer nutritional deficiency (Usher *et al.*, 2020). In addition to this, the COVID-19 pandemic has further destabilized global food production and food security (Khan *et al.*, 2020). In this sense, the current interruption in the continuous food supply is an enormous problem, due to the risk of contagion of SARS-CoV-2 among the staff hired for the harvest, processing, transportation and distribution of food (Henry *et al.*, 2020). The same applies for people who operate the production and supply of inputs needed for agriculture, leading to shortages of such as glass, cardboard and wood needed for containers and packaging, as well as of fuels, fertilizers, herbicides, pesticides, seeds, etc. (Marlow *et al.*, 2020). This has led to reduced incomes for producers, fluctuations in prices and instability in the supply of basic foods, severely affecting nutrition worldwide, and a reduction of up to 22% of the global market.

Thus, the creation and use of easy-access, efficient, economically feasible, socially fair and sustainable agro-biotechnology developed by the same countries is decisive for the production of foods of high nutritional quality and the reduction of vulnerable groups, which would guarantee food security and national sovereignty. Among the most promising strategies are the use of the genetic and metabolic diversity of the microbial genetic resources (MGR) found in agro-ecosystems. This

un modelo de agricultura orgánica han evidenciado resultados prometedores. El estudio, validación e implementación de la combinación de varias técnicas alternativas en la producción agrícola es un campo de acción que puede desarrollarse para la generación de una agricultura sostenible considerando las necesidades nutricionales y de salud de la población. Sin embargo, las políticas públicas de planeación e inversión en investigación deben propiciar el desarrollo tecnológico para una agricultura sustentable. Esto es, crear u optimizar sistemas agrícolas regionales dinámicos que mitiguen o eliminen los daños ambientales asociados con la agricultura tecnificada y que tengan la prioridad de producir alimentos en cantidad suficiente con características nutricionales y nutraceutica que aseguren la salud humana (Goicochea y Antolín, 2017). El propósito es posicionar a la agricultura dentro de un contexto holístico y rescatar su contribución humanística (Horrigán *et al.*, 2002). Se debe reconocer, sin embargo, los grandes desafíos políticos, gubernamentales y geoeconómicos que deben superarse a nivel mundial, nacional y local, tanto para el diseño como para la implementación de las vías de desarrollo agroalimentario más sostenible (Antle y Ray, 2020).

Recursos genéticos microbianos para una agricultura sostenible

En el mundo, una de cada nueve personas, un total de 820 millones, sufre de hambre crónica y más de 2 millones sufre de deficiencia nutricional (Usher *et al.*, 2020). Aunado a esto, la pandemia COVID-19 ha desestabilizado aún más la producción de alimentos y la seguridad alimentaria global (Khan *et al.*, 2020). Actualmente, la interrupción del suministro continuo de alimentos es un fuerte problema debido a la reducción de actividades por riesgos de contagio del SARS-CoV-2 entre el per-

microbiota, as mentioned earlier, is an important component to maintain the chemical and biological fertility of the soil. Inside the microbiota is a group of Plant Growth-Promoting Microorganisms (PGPM) (Valenzuela-Aragon *et al.*, 2019), which interact with the crops through direct and/or indirect action mechanisms, regulating their growth, the production and quality of products by increasing the tolerance of plants to abiotic and biotic stress, improving their nutrition and generating antagonism against phytopathogens and some root pests.

Nowadays, and in the light of the ongoing pandemic, the use of PGPM is an efficient and sustainable alternative for the agricultural sector (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). The beneficial effect of PGPM on crops is a result of several microbial interaction mechanisms with plants, the main ones of which are (Valenzuela-Ruiz *et al.*, 2018; Villarreal-Delgado *et al.*, 2018):

- The biological fixation of atmospheric nitrogen
- The solubilization of minerals
- The induction of plant growth regulators
- The mineralization of organic compounds
- The production of antibiotics
- The production of hydrolytic enzymes
- The biosynthesis of siderophores
- The production of exopolysaccharides
- The induction of systemic responses

The use of PGPM has been proven to lead to increases in the productivity and quality of foods, reducing economic and environmental costs produced by the increased use of synthetic agricultural inputs. For example, Adesemoye *et al.* (2009) inoculated a microbial consortium composed of *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. pumilus* and *Glomus intraradices* on tomato, (*Solanum* sp.) planted with 25% less than the

sonal empleado en cosecha, procesamiento, transporte y distribución de alimentos (Henry *et al.*, 2020). Así mismo, en el personal que opera la producción y suministro de insumos requeridos para la agricultura causando desabasto de vidrio, cartón y madera requeridos para recipientes y embalaje, y de combustibles, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas y semillas etc. (Marlow *et al.*, 2020). Esto ha generado menores ingresos para productores, fluctuación de precios e inestabilidad en la provisión de alimentos básicos, afectando severamente la nutrición a nivel mundial, y una reducción de hasta un 22% del mercado global de alimentos.

La generación y aplicación de agro-biotecnologías desarrolladas por los propios países, fácilmente accesibles, eficientes, económicamente viables, socialmente justas, y sostenibles es determinante para la producción de alimentos de alta calidad nutricional y la reducción de los grupos vulnerables, lo que garantizaría la seguridad alimentaria y la soberanía nacional. Entre las estrategias promisorias destaca el aprovechamiento de la diversidad genética y metabólica de los recursos genéticos microbianos (RGM) presentes en los agroecosistemas. Esta microbiota, como ya se mencionó, es un componente importante para mantener la fertilidad química y biológica del suelo. Dentro la microbiota, existe un grupo de microorganismos promotores de crecimiento vegetal (MPCV) (Valenzuela-Aragon *et al.*, 2019), los cuales interactúan con los cultivos a través de mecanismos de acción directos y/o indirectos, regulando su crecimiento, producción y calidad de los productos al aumentar la tolerancia de las plantas al estrés abiótico y biótico, mejorar su nutrición y generar antagonismo contra fitopatógenos y algunas plagas de raíz.

La actual pandemia, el uso de MPCV representa una alternativa eficaz y sostenible para el sector agrícola (Chávez-Díaz *et al.*, 2020). El efecto benéfico de MPCV en los cultivos es resultado de

recommended amount of fertilizer with a similar effect to the conventional fertilization dose. This consortium improved crop growth, yield, and nutrient absorption (nitrogen and phosphorous). On the other hand, Bakhshandeh *et al.* (2017) reported that the inoculation of *Pantoea ananatis*, *Rahnella aquatilis* and *Enterobacter* sp. on rice (*Oryza* sp.) seeds significantly increased plant height, foliar biomass and potassium absorption in leaves, stem and root. Similarly, Robles-Montoya *et al.* (2020) reported that the inoculation of *Bacillus cabrialesii*, *B. paralicheniformis* and *B. subtilis* on wheat (*Triticum* sp.) seedlings significantly increased the length and dry weight of the aerial section, root length, stem diameter and the biovolume index. Similar results were found in *B. megaterium* and *B. paralicheniformis* (Rojas-Padilla *et al.*, 2020).

The use of the crop-related microbial biodiversity through the MGR of the planet is a sustainable alternative to boost food production with a high nutritional value, in the light of the problems related to the ongoing pandemic. In this sense, the preservation of MGRs is decisive to preserve the beneficial microbiota found in agroecosystems and to provide authentic, stable and biosafe biological material for the development of efficient microbial inoculants (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2021).

Conservation of microbial genetic resources

The conservation of microbial genetic resources (MGR) is crucial to provide relevant technological solutions to the problems faced by human society. The current and future use of these resources is the most important activity of conservation centers, germplasm banks and collections of macro and microorganisms, by means of *in situ*, *ex situ*, and *in-factory* conservation procedures and strategies, mainly in world crises such as the COVID-19

diversos mecanismos de interacción microbiana con las plantas, entre los que destacan (Valenzuela-Ruiz *et al.*, 2018; Villarreal-Delgado *et al.*, 2018):

- Fijación biológica del nitrógeno atmosférico
- Solubilización de minerales
- Inducción de reguladores de crecimiento vegetal
- Mineralización de compuestos orgánicos
- Producción de antibióticos
- Producción de enzimas hidrolíticas,
- Biosíntesis de sideróforos,
- Producción de exopolisacáridos,
- Inducción de respuesta sistémica

Se ha comprobado que el uso de MPCV incrementa la productividad y calidad de los alimentos, reduciendo costos económicos y ambientales, los daños directo a la salud humana generados por la aplicación excesiva de insumos agrícolas sintéticos. Por ejemplo, Adesemoye *et al.* (2009) inocularon un consorcio microbiano integrado por *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. pumilus* y *Glomus intraradices* a jitomate (*Solanum* sp.) cultivado requiriendo 25% menos del fertilizante recomendado con un efecto similar que la dosis de fertilización convencional. Este consorcio mejoró el crecimiento del cultivo, rendimiento y absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo). Análogamente, Bakhshandeh y colaboradores (2017) reportaron que la inoculación de *Pantoea ananatis*, *Rahnella aquatilis* y *Enterobacter* sp. en semillas de arroz (*Oryza* sp.) incrementó significativamente altura de planta, la biomasa foliar y la absorción de potasio por hojas, tallo y raíz. De manera similar, Robles-Montoya *et al.* (2020) reportaron que la inoculación de *Bacillus cabrialesii*, *B. paralicheniformis* y *B. subtilis* a plántulas de trigo (*Triticum* sp.) incrementó significativamente la longitud y peso seco del dosel aéreo, longitud de raíz, diámetro del tallo, y el índice de biovolumen. Similares resultados fueron encontrados

pandemic (Khoury *et al.*, 2010; Mishra *et al.*, 2020; Sung and Hwang, 2015). Mexico has made an effort, in the past 20 years, to establish conservation and investigation centers or laboratories with high-end, specialized human resources (Ayala-Zepeda *et al.*, 2021, in this section) (Figures 3, 4). This effort includes the National Genetic Resource Center of the National Forestry, Agriculture and Livestock Research Center (Centro Nacional de Recursos Genéticos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, or CNRG-INIFAP). The CNRG is the first center of its kind in Mexico with the mission of conserving and preserving the MGR of the country related to the agri-food sector to guarantee the well-being of present and future generations. It has been estimated that the CNRG will be the world's most complete beneficial microbe and plant germplasm bank in the world (SADER, 2016) (Figure 3).

The activities of the Microbial Genetic Resources Laboratory (*Laboratorio de Recursos Genéticos Microbianos*) of the CNRG-INIFAP include the constant search for microbial genetic resources of agricultural interest, which are characterized and identified using different microbiological techniques, valued for their possible agrobiotechnological use or as taxonomic reference material, and the study of biodiversity in the agroecosystems from the application of omic sciences.

Fifty percent of the planet's living biomass is said to be of microbial nature, and although its empirical use has existed for millennia, its systematic study began in the late 19th century with L. Pasteur, R. Koch, F. Cohn, A. De Bary, G.A. Hansen and others, motivated by diseases and epidemics in plants, humans and animals (Mora-Aguilera *et al.*, 2021 in Section 1). The etiological transition to technology implied escalating the cultivation of microorganisms in specialized laboratories to

con *B. megaterium* y *B. paralicheniformis* (Rojas-Padilla *et al.*, 2020).

El uso de la diversidad microbiana asociadas a los cultivos, a través de los RGM del planeta, representa una alternativa sostenible para potenciar la producción de alimentos con alto valor nutricional, ante los problemas asociados a la pandemia actual. En este sentido, la conservación de los RGM es determinante para preservar la microbiota benéfica presente en los agroecosistemas y proveer material biológico auténtico, estable y bioseguro para el desarrollo de inoculantes microbianos eficientes (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2021).

Conservación de recursos genéticos microbianos

La conservación de los recursos genéticos microbianos (RGM) es crucial para proveer soluciones tecnológicas relevantes a los problemas de la sociedad humana. El uso actual y futuro de estos recursos es la actividad más importante de centros de conservación, bancos de germoplasma y los acervos de macro y microorganismos, mediante procedimientos y estrategias de conservación *in situ*, *ex situ*, e *in-factory*, principalmente en crisis mundiales como la pandemia COVID-19 (Khoury *et al.*, 2010; Mishra *et al.*, 2020; Sung and Hwang, 2015). México ha realizado un esfuerzo en los últimos 20 años por establecer centros o laboratorios de preservación e investigación con recurso humano especializado del más alto nivel (Ayala-Zepeda *et al.*, 2021, en esta Sección) (Figura 3, 4). Este esfuerzo incluye al Centro Nacional de Recursos Genéticos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (CNRG-INIFAP). El CNRG es el primer centro de su tipo en México con la misión de conservar y preservar RGM del país asociados al sector agroalimentario para garantizar el bienestar de las generaciones presentes y futuras. Se estima que el CNRG constituirá

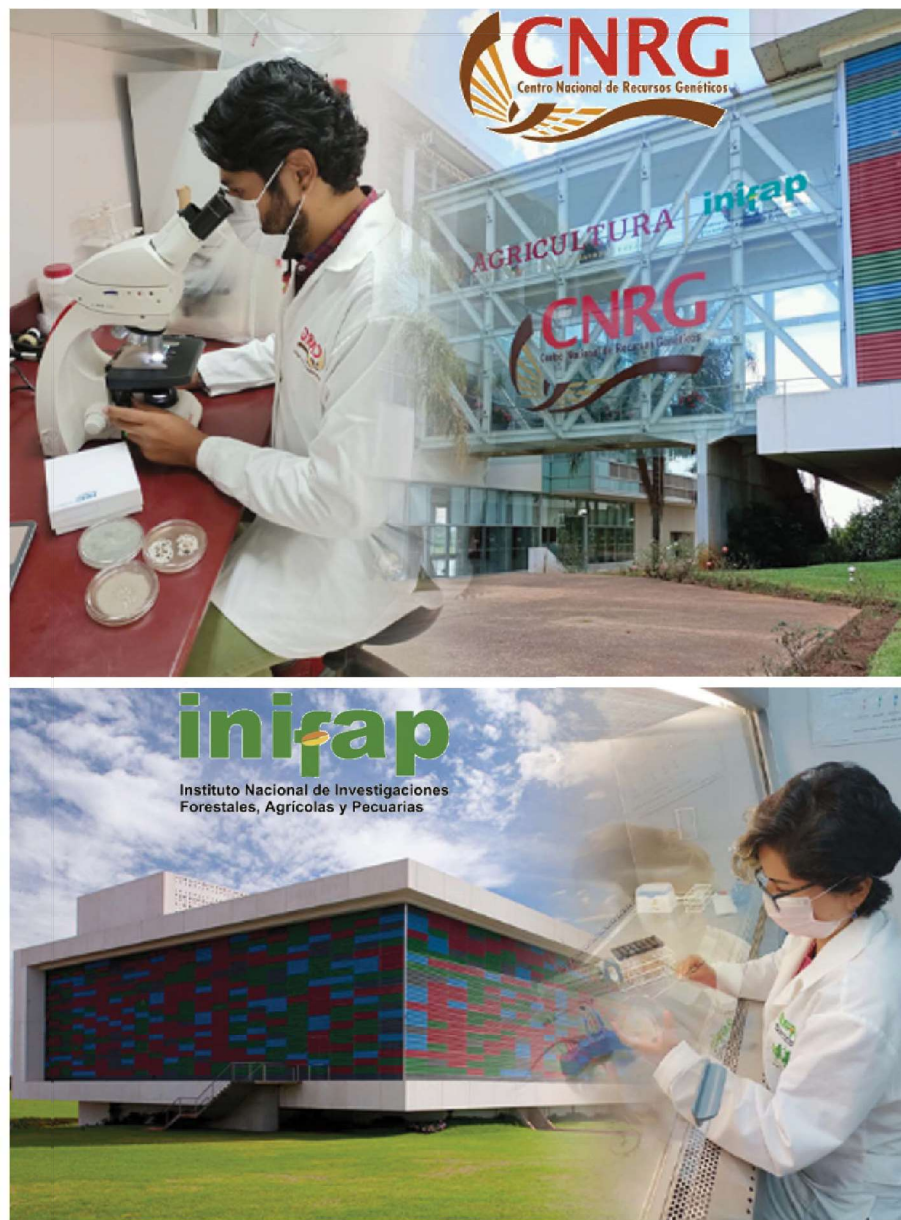


Figure 3. The National Genetic Resource Center of the National Forestry, Agriculture and Livestock Research Center (Centro Nacional de Recursos Genéticos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, or CNRG-INIFAP), created to preserve and protect the beneficial microbe and plant biodiversity related to the Mexican agri-food sector. Researchers of the Microbial Genetic Resources Laboratory (*Laboratorio de Recursos Genéticos Microbianos*) working on the identification of agriculturally important fungi and the conservation of plant growth-promoting bacteria.

Figura 3. Centro Nacional de Recursos Genéticos (CNRG) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), creado para preservar y proteger la biodiversidad vegetal y microbiana benéfica asociada al sector agroalimentario mexicano. Investigadores del *Laboratorio de Recursos Genéticos Microbianos* trabajando en la identificación de hongos de importancia agrícola y la conservación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal.

generate biotechnological developments applicable to agriculture (Desmeth, 2017). In this context, an MGR can be defined as any microbial strain that is authenticated, taxonomically defined, physiologically characterized, with quality control, well-documented and with real or potential value (Sharma *et al.*, 2018) (Figure 4). The 758 collections registered in the World Data Center for Microorganisms (WDCM)(<http://www.wdcm.org/>) facilitate the study of MGRs, since they help find taxonomic reference material and systematize archives on microbial biological diversity in the wide symbiotic spectrum.

Most of these biological resource conservation centers follow the guidelines of the World Federation for Culture Collections (WFCC) (<http://www.wfcc.info/>), the practices of the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (<https://www.oecd.org/>), and the regulations for the access and donation of biological organisms of the Nagoya Protocol on the Convention on Biological Diversity (CBD) (<https://www.cbd.int/abs/>), as well as depositing the inventories of their collections in the Global Catalogue of Microorganisms (GCM) (<http://gcm.wdcm.org/>) to promote the visibility and accessibility of the strains that these centers conserve (Pilling *et al.*, 2020).

The CBD, the international instrument for the conservation of biological diversity, acquires great relevance in these moments, considering that all evidence indicates that the ongoing biodiversity crisis is one of the main factors in the emergence of SARS-CoV-2 (Hossain *et al.*, 2020). Furthermore, the impact of the COVID-19 pandemic on the operation and the conservation status of genetic resources worldwide has undergone scarce evaluation and it is too soon to evaluate its effects (Neupane, 2020). However, both positive and negative consequences are expected, mainly on the inclusion of considerations on human health

el banco de germoplasma microbiano benéfico y vegetal más completo del mundo (SADER, 2016) (Figura 3).

Las actividades del *Laboratorio de Recursos Genéticos Microbianos* del CNRG-INIFAP incluyen la constante búsqueda de recursos genéticos microbianos de interés agrícola, los cuales son caracterizados e identificados por diversas técnicas microbiológicas, valorados para su posible aprovechamiento agrobiotecnológico o como material de referencia taxonómica, y el estudio de la biodiversidad en los agroecosistemas a partir de la aplicación de las ciencias ómicas.

Se estima que 50 por ciento de la biomasa viva del planeta es de naturaleza microbiana y aunque su uso empírico ha existido durante milenios, su estudio sistemático comenzó a fines del siglo XIX con L. Pasteur, R. Koch, F. Cohn, A. De Bary, G.A. Hansen y otros, incentivados por precisamente por enfermedades y epidemias en plantas, humanos y animales (Mora-Aguilera *et al.*, 2021 en Sección 1). La transición etiológica a la tecnológica implicó escalar el cultivo de microorganismos en laboratorios especializados para generar desarrollos biotecnológicos aplicables a la agricultura (Desmeth, 2017). En este contexto, un RGM se puede definir como cualquier cepa microbiana que este autenticada, definida taxonómicamente, caracterizada fisiológicamente, con control de calidad, bien documentada, y con valor potencial o real (Sharma *et al.*, 2018) (Figura 4). Las 758 colecciones registradas en el *Centro Mundial de Datos para Microorganismos* (WDCM, por sus siglas en inglés)(<http://www.wdcm.org/>) facilitan el estudio RGM ya que permite encontrar material de referencia taxonómica y sistematiza acervos de diversidad biológica microbiana en el amplio espectro simbiótico.

La mayoría de estos centros de conservación de recursos biológicos siguen las pautas de la *Federación Mundial de Colecciones de Cultivos* (WFCC,

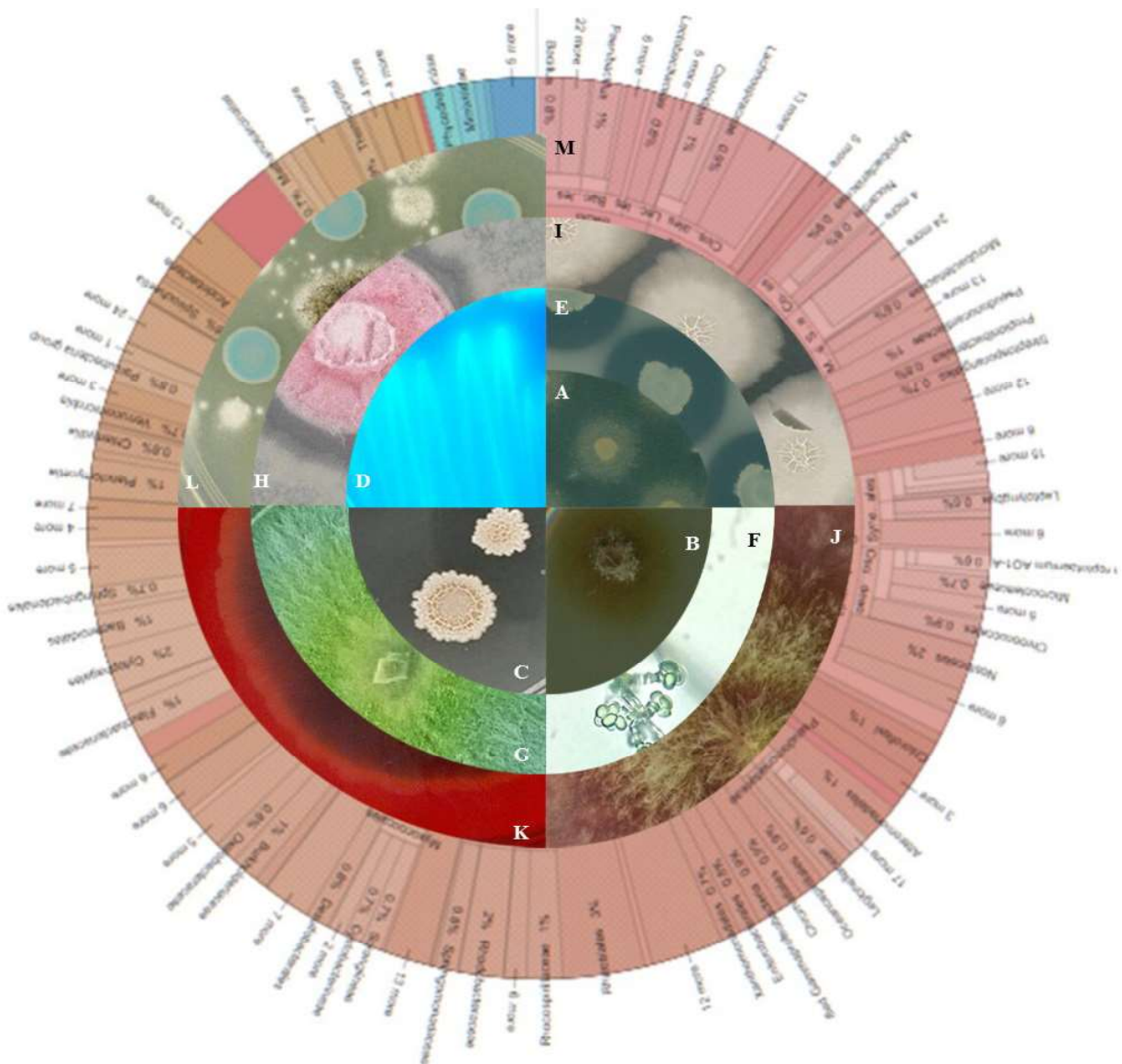


Figure 4. Mexican microbial strains in the process of characterization for their incorporation into the Collection of Microorganisms of the CNRG INIFAP. A) *Pseudomonas* sp. with lipolytic ability; B) *Trichoderma* sp. with lignolytic ability; C) culture of *Bacillus subtilis*; D) *Pseudomonas fluorescens* under ultraviolet light; E) *Pseudomonas protegens* with phosphate-solubilizing ability; F) Structures of *Trichoderma* sp. observed under the microscope; G) *Trichoderma* sp. with plant growth-promoting ability; H) *Bacillus* sp. reducing the growth of *Fusarium* sp; I) *Bacillus amylolyquefaciens*; J) *Fusarium boothii* culture; K) *Trichoderma* sp. with cellulolytic ability; L) *Pseudomonas* sp. reducing the growth of *Aspergillus* sp; M) Preliminary exploratory study of metatranscriptome related to chili pepper plants (*Capsicum* sp).

Figura 4. Cepas microbianas mexicanas en proceso de caracterización para su incorporación a la Colección de Microorganismos del CNRG INIFAP. A) *Pseudomonas* sp. con capacidad lipolítica; B) *Trichoderma* sp. con capacidad lignolítica; C) colonia de *Bacillus subtilis*; D) *Pseudomonas fluorescens* bajo luz ultravioleta; E) *Pseudomonas protegens* con capacidad solubilizadora de fosfatos; F) Estructuras de *Trichoderma* sp. observada al microscopio; G) *Trichoderma* sp. con capacidad promotora de crecimiento vegetal; H) *Bacillus* sp. reduciendo el crecimiento de *Fusarium* sp; I) *Bacillus amylolyquefaciens*; J) colonia de *Fusarium boothii*; K) *Trichoderma* sp. con capacidad celulolítica; L) *Pseudomonas* sp. reduciendo el crecimiento de *Aspergillus* sp; M) Estudio exploratorio preliminar de metatranscriptoma asociado a chile (*Capsicum* sp).

in the planning of land use, the strengthening of links between health and biological diversity to support preventive health approaches, as well as the development of biodiversity legislation, regulation and management aspects in the face of future crises (Bang and Khadakkar, 2020). For example, the diversity of coronaviruses in bats, as a strategy for the prevention of diseases in humans, has been studied for over 10 years, motivated by the emergence of zoonotic diseases SARS-CoV (2003) and MERS-CoV (2012). However, the importance of studies on diversity for human health is now unquestionable, therefore national and international programs for their study have been created or strengthened (Editor's note).

The COVID-19 pandemic puts into perspective the importance of preserving MGR with potential for food security, which involves *in vivo* microbiota and the genomic, proteomic and metabolomic archives. However, there are still knowledge gaps related to the diversity of microorganisms in agro-ecosystems, the identification and characterization of species of diverse taxonomic and functional groups, the biological mechanisms in interaction processes, the participation of MGRs in the supply of services in agro-ecosystems and agri-food production, as well as the effect of climate and microenvironmental changes produced by agricultural practices and the use of synthetic inputs (Sandoval-Cancino *et al.*, 2022; Córdova-Albores *et al.*, 2021; Pilling *et al.*, 2020). On the other hand, the biodiversity of MGRs is dwindling in agro-ecosystems due to the destruction of habitats, the inadequate use of pesticides, the effects of climate change, and others (FAO, 2019). In this context, MGR conservation centers provide valuable biological resources for agricultural, agro-industrial scientists and farmers, since they keep and provide strains or isolations of beneficial microorganisms for different agricultural crops and plantations, authentic reference strains

por sus siglas en inglés) (<http://www.wfcc.info/>), las prácticas de la *Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico* (OECD, por sus siglas en inglés) (<https://www.oecd.org/>), y las regulaciones para el acceso y donación de organismos biológicos del *Protocolo de Nagoya de la Convención sobre la Diversidad Biológica* (CBD, por sus siglas en inglés) (<https://www.cbd.int/abs/>), además de depositar los inventarios de sus colecciones en el *Catálogo Mundial de Microorganismos* (GCM) (<http://gcm.wdcm.org/>) para propiciar la visibilidad y accesibilidad de la cepas que conservan dichos centros (Pilling *et al.*, 2020).

La CBD, el instrumento internacional para la conservación de la diversidad biológica, toma gran relevancia en estos momentos, considerando que las evidencias señalan que la actual crisis de biodiversidad es uno de los factores principales en la emergencia del SARS-CoV-2 (Hossain *et al.*, 2020). Más aun, el impacto de la pandemia COVID-19 sobre la operación y estatus de conservación de recursos genéticos a nivel mundial ha sido poco evaluada y es demasiado pronto para valorar sus efectos (Neupane, 2020). Sin embargo, se esperan consecuencias positivas y negativas, principalmente sobre la inclusión de consideraciones sobre salud humana en la planificación del uso de la tierra, el fortalecimiento de los vínculos entre salud y diversidad biológica para apoyar enfoques preventivos de la salud, así como el desarrollo de aspectos de legislación, regulación y estrategias de manejo de la biodiversidad ante futuras crisis (Bang y Khadakkar, 2020). Por ejemplo, la diversidad de coronavirus en murciélagos, como estrategia de prevención de enfermedades en humanos, se ha estudiado desde hace más de 10 años incentivados por la emergencia de las enfermedades de origen zoonótico SARS-CoV (2003) y MERS-CoV (2012). Sin embargo, ahora es incuestionable la importancia de los estudios de diversidad para la salud humana

with taxonomic value for research purposes. The development of human resources with an expertise in classic and molecular microbiological management, as well as in the comprehension of plant-microorganism interactions is also a fundamental contribution (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2021; Soltanighias *et al.*, 2018).

Apart from the previsions implemented worldwide on the importance of the conservation of MGRs in emergencies such as the COVID-19 pandemic, dissemination on the role MGRs play in the food security of each country is necessary, implementing participatory channels throughout the productive, academic and commercial sectors involved in guaranteeing the regional agricultural produce. The *AgroEvent 'Productos biológicos; una herramienta para potenciar el campo mexicano' (Biological products; a tool to strengthen the Mexican countryside)*, organized by the INIFAP and the Technological Institute of Sonora (Instituto Tecnológico de Sonora) on November 27th, 2020, and its second edition *'Microorganismos para el Desarrollo sostenible del sector agropecuario de México' (Microorganisms for the Sustainable Development of the Mexican Agricultural Sector)* illustrates this strategy (<http://cmcnrg.inifap.gob.mx/agroevento/>; t.ly/RjAh). Its aim was to provide a space to connect and to disseminate information on the use of biological products in agriculture and the importance of effective cost-benefit technologies for the sustainable innovation of technified agricultural production in Mexico. The event, in its two editions, had the institutional participation of Mexican scientists involved in the development and conservation of organisms with a potential for biological control and the implementation of sustainable and profitable agrobiotechnologies for different productive actors. The dissemination of the event via different media led to an attendance of 1,582 people from eight Latin American countries.

por lo que se han creado o fortalecidos programas nacionales e internacionales para su investigación (Nota del Editor).

La pandemia COVI-19 pone en perspectiva la importancia de la conservación de RGM con potencial para la seguridad alimentaria, la cual involucra la microbiota *in vivo* y los acervos genómicos, proteómicos y metabolómicos. Sin embargo, aún existen lagunas de conocimiento relacionadas con la diversidad de microorganismos en agroecosistemas; la identificación y caracterización de especies de diversos grupos taxonómicos y funcionales; los mecanismos biológicos en los procesos de interacción; la participación que tiene los RGM en el suministro de servicios en agroecosistemas y la producción agroalimentaria; así como el efecto de los cambios climáticos y microambientales conferidos por prácticas agrícolas y el empleo de insumos sintéticos (Sandoval-Cancino *et al.*, 2022; Córdova-Albores *et al.*, 2021; Pilling *et al.*, 2020). Por otra parte, la biodiversidad de los RGM está disminuyendo en los agroecosistemas, por la destrucción del hábitat, el uso inadecuado de pesticidas y otros insumos agrícolas, los efectos del cambio climático, entre otros (FAO, 2019). En este contexto, los centros de conservación RGM proporcionan valiosos recursos biológicos para científicos agrícolas, agroindustria y agricultores, al mantener y proveer cepas o aislados de microorganismos benéficos para diferentes cultivos agrícolas y plantaciones, cepas de referencia auténticas con valor taxonómico para fines de investigación. El desarrollo de recursos humanos expertos en manejo microbiológico clásico y molecular, y en la comprensión de las interacciones planta-microorganismo también constituye un aporte esencial (Díaz-Rodríguez *et al.*, 2021; Soltanighias *et al.*, 2018).

Además de las previsiones implementadas a nivel mundial sobre la importancia de la conservación de los RGM ante emergencias como

This indicates the great interest and potential of MGR in agriculture and the vitality of this activity in times of COVID-19.

CONCLUSIONS

This document reassessed the role of the agri-food sector in the light of the current world crisis caused by the COVID-19 pandemic. Based on the premise that the supply of food for the world's population, along with plant health as an essential activity to achieve an optimum yield, are ecosystemic services that rely broadly on the microbiota of the soil and agro-ecosystems, we can argue that biodiversity translates into balance, functionality, productivity and health. Thus, the suppressiveness of plant pathogens is only one benefit of edaphic microbiota. On the other hand, some microorganisms in agroecosystems integrate into the human gut microbiota, contributing towards the prevention of diseases due to their implication in the modulation of responses of immune system and inflammatory responses. For several years, technified agriculture has been considered unsustainable due to the deterioration of the production assets (water, soil, plants) at a higher speed than that at which it can regenerate. The excessive dependence on synthetic inputs (pesticides, herbicides, fertilizers) leads to dysbiosis or a rupture in the complex biological systems, resulting in the degradation of the ecosystemic services. As a consequence, the management of pests, diseases and weeds is inefficient and unsustainable. The gaps produced in ecological niches make nutrient cycles difficult, impacting the infertility and conservation of the health of soils. This leads, both in pesticides as in fertilizers, to a vicious circular strategy with a high cost for the farmer, the environment and society. These unfavorable cycles could eventually

la pandemia de COVID 19, es necesario difundir el rol de RGM en la seguridad alimentaria de cada país, implementando canales participativos entre sectores productivo, empresarial, académico y comercial involucrados en garantizar la producción agrícola regional. El *AgroEvento 'Productos biológicos; una herramienta para potenciar el campo mexicano'*, organizado por INIFAP y el Instituto Tecnológico de Sonora el 27 de noviembre del 2020, así como su segunda edición *'Microorganismos para el desarrollo sostenible del sector agropecuario de México'* llevado a cabo el 30 de septiembre (<http://cmcnrg.inifap.gob.mx/agroevento/t.ly/RjAh>) ilustra esta estrategia. Tuvieron como objetivo proporcionar un espacio para la vinculación y difusión sobre los beneficios del uso de productos de formulación biológica en la agricultura y la importancia de tecnologías beneficio-costeo efectivas para la innovación sustentable de la producción agrícola tecnificada en México. El evento, en sus dos ediciones, ha tenido participación interinstitucional con investigadores mexicanos involucrados en el desarrollo y conservación de organismos con potencial de control biológico y la implementación de agrobiotecnologías sustentables y rentables para diferentes actores productivos. La difusión del evento a través de diferentes canales permitió la asistencia virtual de 1,582 participantes de ocho países latinoamericanos. Una afluencia que indica el gran interés y potencial de RGM en la agricultura y la vitalidad de esta actividad productiva en tiempos de COVID-19.

CONCLUSIONES

En esta revisión se replanteó el papel del sector agroalimentario frente a la actual crisis mundial de salud pública por la pandemia COVID-19. Se partió de la premisa que el abastecimiento global

jeopardize food security and self-sufficiency with a greater effect on communities and countries with a great dependence on external inputs. This became evident with the breakage of the supply chain of agricultural inputs and products due to the COVID-19 pandemic. It is still possible to argue that human health and agricultural productivity can depend on the functionality of agro-ecosystems and on the balance of its biodiversity. The mission of agri-food sciences is to face agriculture with a social and humanistic vision, and in our area of biotechnology, to preserve MGRs and contribute to plant health from an ecological point of view. The study approach must understand the agroecosystems as functional biological units or agricultural holobionts for the creation of sustainable and resilient biotechnology strategies to prevent production crises and to mitigate emerging impacts such as the ongoing pandemic caused by SARS-CoV-2. All countries must generate public policies and invest in research under this sustainable agricultural vision. It is our need and our duty in the face of the environmental deterioration worldwide.

Acknowledgements

The authors are deeply grateful to Dr. Gustavo Mora as editor since his comments and suggestions helped to strengthen this contribution.

LITERATURE CITED

- Adesemoye AO, Torbert HA, and Kloepper JW. 2009. Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology* 58 (4):921-929. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y>
- Alonso-Báez M, and Aguirre-Medina JF. 2011. Efecto de la labranza de conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana* 29 (2):113-121.
- Altieri MA, and Nicholls CI. 2020. Agroecology and the reconstruction of a post COVID-19 agriculture. *The Journal of Peasant Studies* 47:881-898. <https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1782891>

de alimentos para la población, al igual que la fitosanidad como actividad esencial para lograr una producción óptima en calidad y cantidad, son servicios ecosistémicos que dependen estrechamente de la microbiota del suelo de los agroecosistemas. Es posible argumentar que la biodiversidad se traduce en equilibrio, funcionalidad, productividad y en salud humana. Así, supresividad de fitopatógenos es solo uno de los beneficios de la microbiota edáfica. Por otra parte, algunos microorganismos de los agroecosistemas, al integrarse en la microbiota intestinal humana, contribuyen a la prevención de enfermedades por su implicación en la modulación de respuestas del sistema inmune e inflamatorio. Desde hace varios años, la agricultura tecnificada se ha considerado no sostenible debido al deterioro de los activos productivos (agua, suelo, planta) a una velocidad mayor que su regeneración natural. La dependencia excesiva de insumos sintéticos (plaguicidas, herbicidas, fertilizantes) genera disbiosis o ruptura de los sistemas biológicos complejos lo que resulta en el detrimento o eliminación de servicios ecosistémicos. En consecuencia, el manejo de plagas, enfermedades y malezas es ineficiente y no sustentable. Los vacíos generados en nichos ecológicos dificultan el ciclo de nutrientes impactando en la infertilidad y conservación de la salud de suelos. Esto conlleva, tanto con pesticidas como en fertilizantes, a una estrategia circular viciosa de alto costo para el productor, ambiente y sociedad. Estos ciclos desfavorables podrían eventualmente comprometer la seguridad y autosuficiencia alimentaria con mayor efecto en comunidades y países altamente dependientes de insumos externos. Esto quedó en evidencia con la ruptura del suministro de insumos y productos agrícolas debido a la pandemia COVID-19. Aún es posible argumentar que la salud humana, y la productividad agrícola pueden depender de la funcionalidad de los agroecosistemas y del equilibrio de su biodiversidad. La misión de

- Aman F, and Masood S. 2020. How nutrition can help to fight against COVID-19 pandemic. *Pakistan Journal of Medical Sciences* 36(COVID19-S4):S121-S123. 10.12669/pjms.36.COVID19-S4.2776
- Antle JM, and Ray S. 2020. Pathways to sustainable agricultural development. 167-201 p. In Barret C. (ed) *Sustainable Agricultural Development*. Palgrave Macmillan, Cham.
- Bakhshandeh E, Pirdashti H, and Shahsavarpour LK. 2017. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. *Ecological Engineering* 103:164-169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.008>.
- Bang A, and Khadakkar S. 2020. Opinion: Biodiversity conservation during a global crisis: Consequences and the way forward. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (48):29995-29999. <https://doi.org/10.1073/pnas.2021460117>
- Belkaid Y, and Hand T. 2014. Role of the microbiota in immunity and inflammation. *Cell* 157:121-141. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.03.011>.
- Berg G, Rybakova D, Fische D, Cernava T, Vergés MCC, Charles T, Chen X, Cocolin L, Eversole K, Corral GH, Kazou M, Kinkel L, Lange L, Lima N, Loy A, Macklin JA, Maguin E, Mauchline T, McClure R, Mitter B, Ryan M, Sarand I, Smidt H, Schelkle B, Roume H, Kiran GS, Selvin J, de Souza RSC, van Overbeek L, Singh BK, Wagner M, Walsh A, Sissitsch A, and Schlöter M. 2020. Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. *Microbiome*. 8:1-22. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0>
- Berendsen RL, Pieterse CMJ, and Bakker PAHM. 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*. 17:478-486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Bhavani RV and Gopinath R. 2020. The COVID-19 pandemic crisis and the relevance of a farm-system-for-nutrition approach. *Food Security*. 12:881-884. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01071-6>
- Brown J, and Tillier A. 2011. Bridging the gap between genetics and ecology. *Annual Review of Phytopathology* 49:345-67. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095301>
- Chandra AK, Kumar A, Bharati A, Joshi R, Agrawal A, and Kumar S. 2020. Microbial-assisted and genomic-assisted breeding: a two way approach for the improvement of nutritional quality traits in agricultural crops. *3 Biotech* 10:2. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1994-z>
- Chávez-Díaz IF, Zelaya-Molina LX, Cruz-Cárdenas CI, Rojas-Anaya E, Ruíz Ramírez S, and de los Santos-Villalobos S. 2020. Considerations on the use of biofertilizers as a sustainable agro-biotechnological alternative to food security in Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(6):1423-1436. <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/publicaciones>. Consultado diciembre 2020.
- Chidambaram V, Tun NL, Haque WZ, Majella MG, Sivakumar RK, Kumar A, et al. 2020. Factors associated with disease severity and mortality among patients with COVID-19: A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE* 15(11): e0241541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241541>
- Córdova-Albores LC, Zelaya-Molina LX, Ávila-Alistac N, Valenzuela-Ruiz V, Cortés-Martínez NE, Parra-Cota FI, las ciencias del sector agroalimentario es abordar la agricultura con una visión social y humanística, y en nuestra área biotecnológica, conservar la diversidad RGM y contribuir a la fitosanidad desde un punto de vista ecológico. El enfoque debe ser el estudio de los agroecosistemas como unidades biológicas funcionales integrales o holobiontes agrícolas para la generación de estrategias biotecnológicas sustentables y resilientes para la prevención de crisis productivas y para mitigar impactos emergentes como la actual pandemia causada por SARS-CoV-2. Todo país debe generar política pública e invertir en investigación bajo esta visión agrícola sostenible. Es un deber y una necesidad ante el deterioro global del medioambiente.
- ~~~~~ Fin de la versión en Español ~~~~~
- Burgos-Canul YY, Chávez-Díaz IF, Fajardo-Franco ML and de los Santos-Villalobos S. 2021. Omics sciences potential on bioprospecting of biological control microbial agents: the case of the Mexican agro-biotechnology. *Mexican Journal of Phytopathology* 39(1). <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2009-3>
- Cox MJ, Cookson WOCM, and Moffatt MF. 2013. Sequencing the human microbiome in health and disease. *Human Molecular Genetics*. 22:R88-R94. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddt398>
- Cucinotta D, and Vanelli M. 2020. WHO Declares COVID-19 a pandemic. *Acta Biomedica* 91(1):157-160. <https://doi.org/10.23750/abm.v91i1.9397>
- Delgado-Baquerizo M, Riech PB, Trivedi C, Eldridge DJ, Abade S, Alfaro FD, Bastida F, Berhe AA, Cutler NA, Gallardo A, García-Velázquez L, Hart SC, Hayes PE, He JZ, Hseu ZY, Hu HW, Kirchmair M, Neuhauser S, Pérez CA, Reed SC, Santos F, Sullivan BW, Trivedi P, Wang JT, Weber-Grullon L, Williams MA, and Singh BK. 2020. Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*. 4:210-220. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-y>
- Desmeth P. 2017. The Nagoya Protocol applied to microbial genetic resources. 205-217 p. In Kurtböke I. (ed). *Microbial Resources*. Academic Press-Elsevier, London, United Kingdom. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804765-1.00010-2>.
- Dhar D, and Mohanty A. 2020. Gut microbiota and COVID-19 possible link and implications. *Virus Research*. 285:198018. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198018>

- Díaz-Rodríguez AM, Salcedo-Gastelum LA, Félix-Pablos CA, Parra-Cota FI, Santoyo G, Puente ML, Bhattacharya D, Mukherjee J, de los Santos-Villalobos S. 2021. The current and future role of microbial culture collections in food security worldwide. *Frontiers in Sustainable Food Systems* in press. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2020.614739>
- Ecker O, Breisinger C and Pauw K. 2011. Chapter 6: Growth is good, but is not enough to improve nutrition 47-54 p. In: (Eds) Fan y Pandya-Lorch, Reshaping agriculture for nutrition and health. International Food Policy Research Institute (IFPRI). USA. <https://www.ifpri.org/publication/reshaping-agriculture-nutrition-and-health>. Consultado diciembre 2020.
- FAO. 2017. Towards zero hunger and sustainability. The FAO Multipartner Programme Support Mechanism. <http://www.fao.org/documents/card/es/c/fa6a801c-5bd4-4522-a2ff-bfbef1e56529/>. Consultado diciembre 2020.
- FAO. 2019. The state of the world's biodiversity for food and agriculture (Rome, Italy: FAO), 572p. <http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129en.pdf>.
- FAO. 2020a. Novel Coronavirus (COVID-19). <http://www.fao.org/2019-ncov/q-and-a/en/>. Consultado diciembre 2020.
- FAO. 2020b. World Food Situation: FAO food price index. <http://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/en/>. (Consulta, diciembre 2020).
- FAO. 2020c. Food systems and COVID-19 in Latin America and the Caribbean: Contingency plan for an eventual food supply crisis. Bulletin 6. Santiago, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9333en>. Consulto diciembre 2020.
- FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2020. Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020. Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9699es>. Consultado febrero 2021.
- Francis D. 2020. Agriculture, climate change and COVID-19. IICABlog. <https://blog.iica.int/en/blog/agriculture-climate-change-and-covid-19>. Consultado octubre 2020.
- Goicochea N and Antolín MC. 2017. Increased nutritional value in food crops. *Microbial biotechnology*. 10:1004-1007. doi: 10.1111/1751-7915.12764
- Griebler C, and Abramov M. 2015. Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*. 34:355-367. <https://doi.org/10.1086/679903>.
- Haleem A, and Javaid M. 2020. Effects of COVID-19 pandemic in daily life. *Current Medicine Research and Practice* 10:78-79. <https://doi.org/10.1016/j.cmrp.2020.03.011>
- Hassani MA, Durán P, and Hacquard S. 2018. Microbial interactions within the plant holobiont. *Microbiome*. 6:1-17. <https://doi.org/10.1186/s40168-018-0445-0>
- Hossain I, Aktaruzzaman MM, Khan MH, and Mullick AR. 2020. A converse association: how biodiversity and wildlife connected with COVID-19. *European Journal of Pharmaceutical and Medical Research* 7 (10): 209-214. https://www.ejpmr.com/home/abstract_id/7326. Consultado enero 2021.
- Heller NE, and Zavaleta ES. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142:14-32. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>
- Henry R. 2020. Innovations in agriculture and food supply in response to the COVID-19 pandemic. *Molecular Plant* 13:1095-1097. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2020.07.011>.
- Horrigan L, Lawrence RS, and Walker P. 2002. How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture. *Environmental Health Perspectives* 110 (5):445-456. doi: 10.1289/ehp.02110445
- Infusino F, Marazzato M, Mancone M, Fedele F, Mastroianni CM, Severino P, Ceccarielli G, Sntinelli L, Cavarretta E, Marullo AGM, Miraldi F, Carnevale R, Nocella C, Biondi-Zoccai G, Pagnini C, Schiavon S, Pugliese F, Frati G, and d'Ettore G. 2020. Diet supplementation, probiotics, and nutraceuticals in SARS-CoV-2 Infection: A scoping review. *Nutrients* 12:1718. <https://doi.org/10.3390/nut12061718>
- Khan N, Naseem Siddiqui B, Khan N, Ullah N, Wali A, Uddin Khan I, Ismail S and Ihtisham M. 2020. Drastic impacts of COVID-19 on food, agriculture and economy. *Pure and Applied Biology* 10 (1):62-68. <http://dx.doi.org/10.19045/bspab.2021.100008>
- Khoury C, Laliberte' B, and Guarino L. (2010) Trends in ex situ conservation of plant genetic resources: a review of global crop and regional conservation strategies. *Genetic Resources and Crop Evolution* 57 (4): 625-639. <https://doi.org/10.1007/s10722-010-9534-z>
- Lata RK, Divjot K, and Nath YA. 2019. Endophytic microbiomes: biodiversity, ecological significance and biotechnological applications. *Research Journal of Biotechnology* 14:143-162. <https://www.semanticscholar.org/paper/Paper-%3A-Endophytic-Microbiomes-%3A-Biodiversity-%2C-and-Lata-Divjot/b3845600266b2d2fad531f7e0a66d2da86f9d957>
- Legrand F, Picot A, Cobo-Díaz JF, Carof M, Chen W, and Le Floch G. 2018. Effect of tillage and static abiotic soil properties on microbial diversity. *Applied Soil Ecology* 132:135-145. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.016>
- Marsden T and Smith E. 2005. Ecological entrepreneurship: sustainable development in local communities through quality food production and local branding. *Geoforum*. 36(4):440-451. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2004.07.008>.
- Marlow S. 2020. COVID-19: Effects on the Fertilizer Industry. *IHS Market* 24(3): 2-6. <https://ihsmarkit.com/research-analysis/report-covid19-effects-on-the-fertilizer-industry.html>. Consultado diciembre 2020.
- Martínez-Blanco J, Lazcano C, Christensen TH, Muñoz P, Rieradevall J, Möller J, Antón A, and Boldrin A. 2013. Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33 (4):721-732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>
- Matveeva, T., Provorov, N., and Valkonen, J. (2018). Editorial: Cooperative adaptation and evolution in plant-microbiome system. *Frontiers in Plant Science* 9 (1090). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01090>

- McDonald B. 2004. Population genetics of plant pathogens. Zurich, Switzerland: Institute of Plant Science/Pathology. <https://doi.org/10.1094/PHI-A-2004-0524-01>
- Mercado-Mercado G, Blancas-Benítez F, Zamora-Gasca VM, and Sáyo-Ayerdi SG. 2020. Mexican traditional plant-foods: polyphenols bioavailability, gut microbiota metabolism and impact in human health. *Current Pharmaceutical Design* 25:3434-3456. <https://doi.org/10.2174/1381612825666191011093753>
- Mishra PK, Joshi S, Gangola S, Khatri P, Bisht JK, and Pattanayak A. 2020. Psychrotolerant Microbes: Characterization, conservation, strain improvements, mass production, and commercialization. 227-246 p. *In* Goel R., Soni R. and Suyal DC (eds). *Microbiological Advancements for Higher Altitude Agro-Ecosystems & Sustainability*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1902-4_1
- Neupane D. 2020. How conservation will be impacted in the COVID-19 pandemic. *Wildlife Biology* 2020. <https://doi.org/10.2981/wlb.00727>
- Olesen SW, and Alm EJ. 2016. Dysbiosis is not an answer. *Nature Microbiology* 1:16228. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.228>
- Park W. 2018. Gut microbiomes and their metabolites shape human and animal health. *Journal of Microbiology* 56:151-153. <https://doi.org/10.1007/s12275-018-0577-8>
- Patle GT, Kharpude SN, Dabral PP, and Kumar V. 2020. Impact of organic farming on sustainable agriculture system and marketing potential: A review. *International Journal of Environment and Climate Change* 10 (11): 100-120. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2020/v10i1130270>
- Pilling D, Bélanger J, Diulgheroff S, Koskela J, Leroy G, Mair G, and Hoffmann I. 2020. Global status of genetic resources for food and agriculture: challenges and research needs. *Genetic Resources* 1 (1):4-16. <https://doi.org/10.46265/genresj.2020.1.4-16>
- Power AG. 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365:2959-2971. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>
- Robles-Montoya RI, Chaparro-Encinas LA, Parra-Cota FI, and de los Santos-Villalobos S. 2020. Improving biometric traits of wheat seedlings with the inoculation of a consortium native of *Bacillus*. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* 11(1): 229-235. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2162>
- Rojas-Padilla J, Chaparro-Encinas LA, Robles-Montoya RI, and de los Santos-Villalobos S. 2020. Growth promotion on wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) by coinoculation of native *Bacillus* strains isolated from the Yaqui Valley, Mexico. *Nova Scientia* 12 (1): 1-27. <https://doi.org/10.21640/ns.v12i24.2136>
- Sahu N, Vasu D, Sahu A, Lal N, and Singh SK. 2017. Strength of microbiomes in nutrient cycling: a key to soil health. 69-86 p. *In* Meena *et al.* (eds) *Agriculturally important microbes for sustainable agriculture*. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5589-8_4
- Saleem M, Hu J, and Jousset A. 2019. More than the sum of its parts: microbiome biodiversity as driver of plant growth and soil health. *Annual Reviews of Ecology, Evolution and Systematics* 50:145-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>
- Sandoval-Cancino G, Zelaya-Molina LX, Ruíz-Ramírez S, Cruz-Cárdenas CI, Aragón-Magadán MA, Rojas-Anaya E, Chávez-Díaz IF. 2022. Agricultural genetic resources as a source of resilience in the face of the COVID-19 pandemic in Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 25(2022):006. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3841>. Consultado octubre 2021.
- Sharma SK, Singh SK, Ramesh A, Sharma PK, Varma A, Ahmad E, Khande R, Singh UB, and Saxena AK. 2018. Microbial genetic resources: status, conservation, and access and benefit-sharing regulations. 1-33 p. *In* Sharma SK and Varma A (eds). *Microbial Resource Conservation*. Soil Biology, vol 54. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96971-8_1
- Singh A, Kumari R, Yadav AN, Mishra S, Sachan A, and Sachan SG. 2020. Chapter 1: Tiny microbes, big yields: Microorganisms for enhancing food crop production for sustainable development. 1-15 p. *In* Rastegari *et al.* (eds). *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820526-6.00001-4>
- Singh BK, and Trivedi P. 2017. Microbiome and the future for food and nutrient security. *Microbial Biotechnology* 10 (1):50. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12592>
- Soltanighias T, Vaid RK, and Rahi P. 2018. Agricultural microbial genetic resources: application and preservation at microbial resource centers. 141-173 p. *In* Sharma SK and Varma A. (eds). *Microbial Resource Conservation*. Soil Biology, vol 54. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96971-8_2
- Song SJ, Woodhams DC, Martino C, Allaband C, Mu A, Javorschi-Miller-Montgomery S, Suchodolski JS, and Knight R. 2019. Engineering the microbiome for animal health and conservation. *Experimental Biology and Medicine*, 244 (6):494-504. <https://doi.org/10.1177/1535370219830075>
- Stanisavljevic N, Bajic SS, Jovanovic Z, Matic I, Tolinacki M, Popovic D, Popovic N, Terzic-Vidojevic A, Golc N, Beskoski V, and Samardzic J. 2020. Antioxidant and antiproliferative activity of allium ursinum and their associated microbiota during simulated *in vitro* digestion in the presence of food matrix. *Frontiers in Microbiology* 11:601616. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.601616>
- Subedi R, Karki M, and Panday D. 2020. Food system and water-energy-biodiversity nexus in Nepal: A review. *Agronomy* 10 (8):1129. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081129>
- Sung B, and Hwang K. 2017. Promoting the utilization of plant, animal and microbial genetic resources for research and development in biotechnology: evidence on researchers'

- preferences for specific attributes from Korean genebanks. *Plant Genetic Resources* 15 (3):195-207. <https://doi.org/10.1017/S1479262115000520>
- Thanner S, and Drissner D, Walsh F. 2016. Antimicrobial resistance in agriculture. *MBio* 7:e02227-15. <https://doi.org/10.1128/mBio.02227-15>
- Thrall P, Oakeshott J, Fitt G, Southerton S, Burdon J, Sheppard A, Russell RJ, Zalucki M, Heino M, and Ford-Deison R. 2011. Evolution in agriculture: the application of evolutionary approaches to the management of biotic interactions in agroecosystems. *Evolutionary Applications* 4:200-215. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00179.x>
- Thomashow LS, LeTourneau MK, Kwak YS, and Weller DM. 2019. The soil-borne legacy in the age of the holobiont. *Microbial Biotechnology* 12:51-54. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13325>
- Tooker J, O'Neal M, and Rodríguez-Saona C. 2020. Balancing disturbance and conservation in agroecosystems to improve biological control. *Annual Review of Entomology* 65 (2020):81-100. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025143>
- Turnbaugh PJ, Ley RE, Hamady M, Fraser-Liggett CM, Knight R, and Gordon JI. 2007. The human microbiome project. *Nature* 449:804-810. <https://doi.org/10.1038/nature06244>
- Trivedi P, Leach JE, Tringe SG, Sa T, and Singh BK. 2020. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology* 18:607-621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
- Siche R. 2020. What is the impact of COVID-19 disease on agriculture? *Scientia Agropecuaria*. 11 (1):3-6. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.01.00>
- Simon JC, Marchesi JR, Mougel C, and Selosse MA. 2019. Host-microbiota interactions: from holobiont theory to analysis. *Microbiome*. 7:1-5. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0619-4>
- Usher K, Durkin J, and Bhullar N. 2020. The COVID-19 pandemic and mental health impacts. *International Journal of Mental Health Nursing* 29 (3): 3-15. <https://doi.org/10.1111/inm.12726>
- Valenzuela-Aragón B, Parra-Cota FI, Santoyo G, Arellano-Wattenbarger GL, and de los Santos-Villalobos S. 2019. Plant-assisted selection: a promising alternative for in vivo identification of wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) growth promoting bacteria. *Plant and Soil* 435: 367-384. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-03901-1>
- Valenzuela-Ruiz V, Ayala-Zepeda M, Arellano-Wattenbarger GL, Parra-Cota FI, García-Pereyra J, Aviña-Martínez GN, and de los Santos-Villalobos S. 2018. Microbial culture collections and their potential contribution to current and future food security. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 14 (1):18-25. <https://www.itson.mx/publicaciones/rln/Documents/v14-n1-3.pdf>. Consultado diciembre 2020.
- Villarreal-Delgado MF, Villa-Rodríguez ED, Cira-Chávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, and de los Santos-Villalobos S. 2017. The genus *Bacillus* as a biological control agent and its implications in the agricultural biosecurity. *Revista Mexicana de Fitopatología* 36 (1):95-130. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1706-5>
- Wagg C, Bender F, Widmer F, and van der Heijden MGA. 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111:5266-5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- Wall DH, Nielsen UN, and Six J. 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature* 528:69-76. <https://doi.org/10.1038/nature15744>
- Wei Z, Gu Y, Friman VP, Kowalchuk GA, Xu Y, Shen Q, and Jousset A. 2019. Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health. *Science Advances* 5:1-11. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw0759>
- Whipps J, Lewis K, and Cooke R. 2001. Mycoparasitism and plant disease control. 161-187 p. *In* Burge M (ed): *Fungi Biol Control Syst*. Manchester University Press.
- Zhan J. 2016. Population genetics of plant pathogens. *In* B. McDonald (ed.). *eLS*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021269.pub2>
- Zhang J, van der Heijden MGA, Zhang F, and Bender F. 2020. Soil biodiversity and crop diversification are vital components of healthy soils and agricultural sustainability. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 7:236-242. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2020336>