Regeneración Agroecológica: una disciplina emergente basada en el Holobionte

Agroecological Regeneration: an emerging discipline based on the Holobiont

Griffon, D.[1,2*], Pino, C.[2]

[1] Laboratorio de Evolución y Ecología Teórica, Facultad de Ciencias, Instituto de Zoología y Ecología Tropical, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
[2] Centro I + D Agroecología, Curicó, Chile.

ARTICLE INFO

Article history:
Received 21-04-2026
Accepted 22-06-2026

Keywords:
Agroecology
Regenerative Agriculture
Holobiont
Microbiome
Ecological Networks
Soil Health

Original Article,
Agroecology and Sustainable Agricultural Systems

**Corresponding author:*
Griffon, D.
E-mail address:
griffondiego@gmail.com

ABSTRACT

Profitability constraints and the climate crisis demand management strategies that integrate ecological resilience with productive viability in agricultural systems. This study proposes and develops the foundations of Agroecological Regeneration, which positions the holobiont (the plant and its microbiome) as the central unit for diagnosis and management aimed at restoring the functionality of degraded agricultural systems. As an emerging discipline, Agroecological Regeneration seeks to integrate the scientific rigor of agroecology with the practical orientation of regenerative agriculture. This work presents the operational principles of Agroecological Regeneration and a Holobiont-based Holistic Diagnosis protocol that integrates microbial analysis, soil physicochemical assessment, sap analysis, and macroecological evaluation of the agroecosystem. The protocol was applied to 20 agricultural units in the Maule region (Chile) to characterize their functional states. Most of the conventional systems evaluated exhibited disruption of their ecological networks, while only one unit showed functional attributes consistent with regenerative management. These results demonstrate that the proposed approach enables the functional diagnosis of agricultural systems and supports the design of targeted interventions aimed at rebuilding the ecological interaction networks required for proper agroecosystem functioning.

RESUMEN

Los problemas de rentabilidad y la crisis climática demandan estrategias de manejo que integren resiliencia ecológica y viabilidad productiva para los sistemas agrícolas. En este trabajo se propone y desarrollan las bases de la Regeneración Agroecológica, que sitúa al holobionte (planta y su microbioma) como unidad central de diagnóstico y manejo para restaurar la funcionalidad de sistemas agrícolas degradados. La Regeneración Agroecológica como disciplina emergente, propone la integración entre la rigurosidad científica de la agroecología y la practicidad de la agricultura regenerativa. En este trabajo se presentan los principios operativos de la Regeneración Agroecológica y un protocolo de Diagnóstico Holístico basado en el Holobionte que integra análisis microbiano, físico-químico de suelo, análisis de savia y evaluación ecológica macro del agroecosistema. Se aplicó este protocolo a 20 unidades agrícolas del Maule (Chile) para caracterizar sus estados funcionales. La mayoría de las unidades convencionales evaluadas mostró una disrupción de sus redes ecológicas. Solo una unidad agrícola presentó atributos funcionales consistentes con manejo regenerativo. De esta manera se puede constatar, que el enfoque propuesto permite diagnosticar funcionalmente sistemas agrícolas y diseñar intervenciones dirigidas a reconstruir las redes de interacción ecológicas necesarias para el correcto funcionamiento de los agroecosistemas.

Palabras clave: Agroecología, Agricultura Regenerativa, Holobionte, Microbioma, Redes Ecológicas, Salud del Suelo.

ESTADO ACTUAL DE LA AGRICULTURA

La agricultura contemporánea atraviesa una encrucijada sin precedentes, caracterizada por la tensión entre la viabilidad económica y la crisis climática. Un ejemplo claro de esta situación es la denominada "crisis del nitrógeno" en los Países Bajos (Stokstad, 2019; Erisman, 2021). El origen de esta se encuentra en medidas adoptadas por el Gobierno de los Países Bajos que, en un intento por cumplir con las normativas ambientales de la Unión Europea sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno y amoniaco, propuso modificaciones drásticas en la ganadería y en el uso de fertilizantes (Stokstad, 2019; Erisman, 2021; Upham *et al.,* 2025). Generando una oleada de protestas masivas, donde los agricultores bloquearon centros de distribución y autopistas, mostrando una fractura entre las metas de sostenibilidad y la viabilidad

económica del sector primario (Van der Ploeg, 2020; Upham *et al.,* 2025).

Este fenómeno no fue un caso aislado. Las imágenes de tractores bloqueando arterias viales se repitieron en España, Francia, Alemania, Hungría y Polonia (Chislett, 2024; Upham *et al.,* 2025). El descontento trascendió las fronteras europeas; en la India, por ejemplo, se vivió una de las protestas agrarias más grandes de la historia reciente contra las leyes de liberalización del mercado agrícola, que los agricultores entienden como una amenaza a su subsistencia frente a las grandes corporaciones (Narayanan, 2021; Behl, 2022; Narula, 2022; Singh, 2023).

El denominador común de estos conflictos es la falta de rentabilidad estructural de la actividad agrícola (Hendrickson *et al.,* 2017; Upham *et al.,* 2025). Los productores se enfrentan a un escenario tipo "alicate": por un lado, un incremento sostenido de los costos de los insumos (combustibles, fertilizantes y maquinaria); por otro, precios de venta estancados o determinados por cadenas de distribución globales y dinámicas de especulación financiera (Upham *et al.,* 2025). A escala global, la agricultura enfrenta además una creciente crisis asociada a la escasez de agua para riego (Fitton *et al.,* 2019; Rosa *et al.,* 2020; Liu *et al.,* 2022; He y Rosa, 2023). A esto se suma el aumento de la burocracia y de las normativas ambientales que, si bien son necesarias, son percibidas por los pequeños y medianos productores como una carga difícil de sostener (Mettepenningen *et al.,* 2008; DeLonge *et al.,* 2016).

En Europa, la respuesta política inmediata para calmar la agitación social fue relajar ciertas metas de sostenibilidad de la Política Agrícola Común, como las obligaciones de barbecho o de reducción en el uso de pesticidas (European Commission, 2024a; 2024b). Sin embargo, esta situación ocurre en un contexto de crisis climática. En años recientes se han registrado temperaturas récord a nivel global, con olas de calor y sequías que han mermado rendimientos en cultivos estratégicos como el trigo, el maíz y el olivo (Biswas *et al.,* 2025; Hultgren et al. 2025).

Resulta, por decir lo menos, paradójico que, frente a la evidencia de que los efectos más severos del cambio climático recaerán precisamente sobre la agricultura (Challinor *et al.,* 2014; Tigchelaar *et al.,* 2018; IPCC, 2022; Hultgren et al. 2025), la respuesta política preponderante sea reducir la ambición ambiental en este sector. Esta contradicción subraya la urgencia de abandonar los parches coyunturales e impulsar decididamente una agricultura alternativa de base ecológica que sea, al mismo tiempo, resiliente y económicamente viable (Upham *et al.,* 2025). Por su parte, el sector de la agricultura alternativa enfrenta desafíos estructurales propios, tales como la crisis del modelo exportador (asociada a su elevada huella ecológica), restricciones en los límites máximos de residuos, carencia de mano de obra capacitada, altos costos operativos y logísticos, incluyendo los costos y la ineficiencia energética asociados al uso de energía de origen fósil; y la falta de alternativas eficientes para determinados insumos convencionales (Erisman, 2021; Upham *et al.,* 2025). Por esto, si bien la agricultura alternativa es una opción clara para enfrentar los retos climáticos, la pérdida de los suelos y la necesidad de obtener alimentos saludables; resulta imprescindible realizar un esfuerzo sustantivo y sostenido en investigación y desarrollo en el área, así como impulsar nuevas disciplinas que aborden de manera explícita estos condicionantes productivos y económicos.

ESTADO ACTUAL DE LA AGROECOLOGÍA

Dentro del espectro de las agriculturas alternativas, la agroecología se destaca por poseer el basamento científico más robusto, respaldado por décadas de investigación y un vasto número de publicaciones (Wezel *et al.,* 2009). Sin embargo, esta disciplina enfrenta actualmente una crisis de identidad y despliegue.

Si bien las causas son multifactoriales, un punto de inflexión relevante fue el Segundo Simposio Internacional sobre Agroecología celebrado en Roma en abril de 2018, promovido por la FAO (FAO, 2018). Este evento culminó con el lanzamiento de la iniciativa llamada: *Scaling up Agroecology Initiative*, diseñada para transformar los sistemas alimentarios en apoyo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Aunque sobre el papel parecía un avance, esta institucionalización fue recibida con escepticismo y rechazo por gran parte de los movimientos sociales de base que apoyan la agroecología, como La Vía Campesina (Giraldo y Rosset, 2018, Rosado-May, 2019; Valdés, 2019; Alonso-Fradejas *et al.,* 2020; Altieri, 2021; Held, 2021).

Estos movimientos denunciaron lo que denominaron "agroecología chatarra" o cooptación de la agroecología, una versión descafeinada y tecnocrática, despojada de su contenido político y social transformador, denunciando que ésta en realidad es funcional a los intereses de las corporaciones transnacionales de la agricultura industrial (Giraldo y Rosset, 2018; Alonso-Fradejas *et al.,* 2020). Este debate generó una fractura, evidente en múltiples artículos de opinión y contra-cumbres organizadas por los movimientos sociales vinculados a la agroecología (Rosado-May, 2019; Valdés, 2019; Alonso-Fradejas *et al.,* 2020; Altieri, 2021; Held, 2021).

Paralelamente, la academia y el activismo agroecológico volcaron gran parte de su atención hacia temas transversales de importancia como, por ejemplo: ecofeminismos y diversidades sexuales, afectividades ambientales o epistemologías del sur (ver, por ejemplo, los ejes temáticos en: SOCLA, 2024). Sin embargo, este giro desvió el foco de los problemas productivos "duros" mencionados en la sección anterior: la rentabilidad de la agricultura y la adaptación técnica inme-

diata al cambio climático. Un resultado paralelo de este proceso, es que la agroecología ha quedado asociada discursivamente a la agricultura de pequeña escala y al campesinado, con una mirada idealizada y nostálgica, muy desvincula de la realidad rural actual (ver: Altieri y Nicholls, 2021; Dagunga *et al.,* 2023; Wienhold y Goulao, 2023; Roop *et al.,* 2023; Vizuete *et al.,* 2024).

El abandonó del discurso técnico-productivo ha permitido que otras escuelas de agricultura alternativa, centradas en lo pragmático crezcan a un ritmo superior. El caso más notable es el de la Agricultura Regenerativa (Rhodes, 2017; Newton *et al.,* 2020; Khangura *et al.,* 2023; Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025). Esta ha asumido explícitamente el reto de la gran escala (LaCanne y Lundgren, 2018; Jayasinghe *et al.,* 2023; Khangura *et al.,* 2023; Garbisu *et al.,* 2025; Jiménez-Ballesta *et al.,* 2025), que es en realidad donde reside la mayor parte de la huella ecológica de la agricultura a nivel mundial y donde los cambios en las prácticas de manejo pueden tener el impacto ambiental más significativo (Miao *et al.,* 2023; Pino y Griffon, 2024; Nasim y Furrukh, 2025; Pan *et al.,* 2025; Recepoğlu *et al.,* 2025). Los resultados de este proceso son evidentes, por ejemplo, al analizar las tendencias de búsqueda globales en Google Trends (ver Figura 1). En la figura se observa un patrón claro: mientras el interés por el término "agroecology" se mantiene relativamente estable o con un crecimiento moderado, las búsquedas asociadas a "regenerative agriculture" ha experimentado un crecimiento sorprendente en la última década, superando a la agroecología.

RELACIÓN ENTRE LA AGROECOLOGÍA Y LA AGRICULTURA REGENERATIVA

A pesar de las tensiones descritas, existe una continuidad técnica innegable entre la Agroecología y la Agricultura Regenerativa. Para entender la conexión entre ambas, es útil recurrir a los niveles de la transición hacia la agroecología propuestos por Stephen Gliessman (Gliessman, 2016). Este autor plantea cinco etapas:

1. Incremento de la eficiencia en el uso de insumos convencionales.
2. Sustitución de insumos sintéticos por prácticas y bioinsumos alternativos.
3. Rediseño del agroecosistema.
4. Reconexión entre consumidores y productores.
5. Construcción de un nuevo sistema alimentario global.

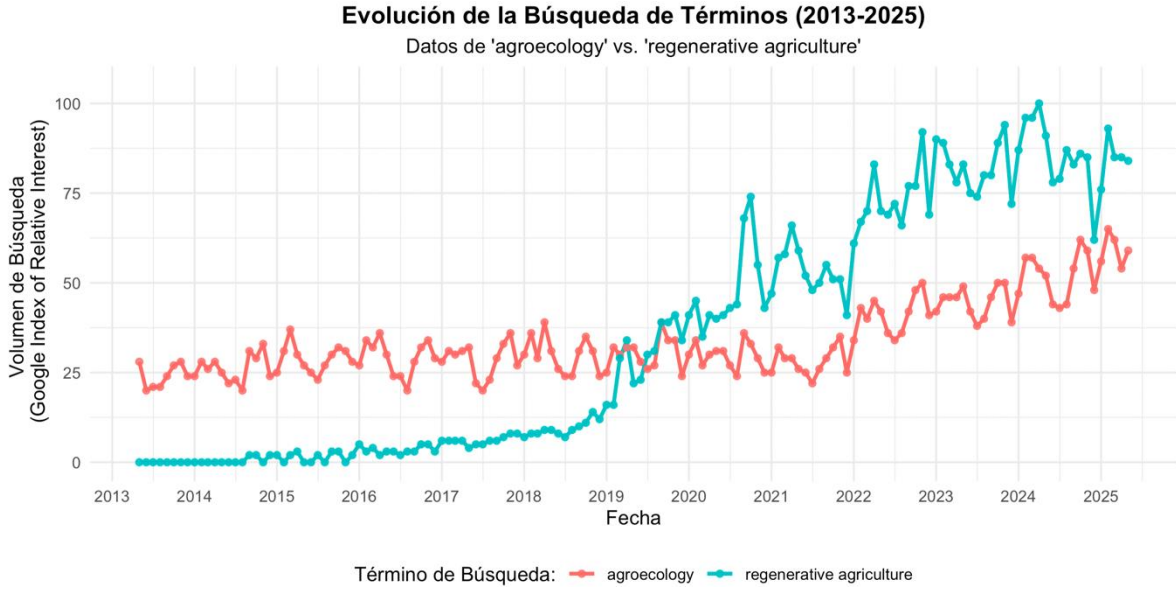


Figura 1. Evolución del interés de búsqueda a nivel mundial sobre los términos 'agroecology' y 'regenerative agriculture' entre 2013 y 2025. Los datos provienen de Google Trends™ y miden la popularidad de las búsquedas en inglés a nivel global. El eje Y representa el Índice de Interés Relativo (Index of Relative Interest), una métrica normalizada donde el valor de 100 se asigna al punto de máximo interés alcanzado por cada término en el periodo de tiempo y ubicación definidos. Un valor de 50 indica que el volumen de búsqueda relativa fue la mitad del valor máximo, y un valor de 0 indica datos insuficientes para ser cuantificados.

Figure 1. Global evolution of search interest for the terms "agroecology" and "regenerative agriculture" between 2013 and 2025. Data were obtained from Google Trends™ and represent the worldwide popularity of searches conducted in English. The y-axis shows the Relative Interest Index, a normalized metric in which a value of 100 corresponds to the peak search interest reached by each term within the selected time period and geographic scope. A value of 50 indicates that the relative search volume was half of the maximum value, whereas a value of 0 indicates insufficient data to be quantified.

La práctica actual de la agricultura regenerativa coincide plenamente con las tres primeras etapas (Rhodes, 2017; Newton *et al.,* 2020; Khangura *et al.,* 2023; Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025). Su enfoque comienza con la optimización (etapa 1), reduciendo al mínimo la aplicación de fertilizantes químicos y laboreo (Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025). Avanza hacia la sustitución (etapa 2), reemplazando insumos tóxicos por bioinsumos, aplicación de enmiendas en base a compost y abonos verdes (Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025). Finalmente, promueve el rediseño predial (etapa 3) basado en la biomímesis, buscando que el agroecosistema imite la estructura y función de los ecosistemas naturales, haciendo uso, por ejemplo, de cultivos de cobertura y corredores biológicos con incorporación de especies nativas adaptadas, integración animal y policultivos para aumentar la resiliencia y la diversificación funcional (Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025).

Dado que estos eran los objetivos agronómicos originales de la agroecología (Gliessman, 1998), la agricultura regenerativa no debe verse como un enemigo, sino como una "puerta de entrada" pragmática a la agroecología (Griffon, 2025). En el caso de la agricultura a gran escala, ejecutar estos tres pasos es una necesidad para poder sobrevivir al colapso de suelos y clima (Miao *et al.,* 2023; Nasim y Furrukh, 2025; Pan *et al.,* 2025; Recepoğlu *et al.,* 2025). Además, la experiencia demuestra que los agricultores que tienen éxito gracias al empleo de prácticas ecológicas a menudo desarrollan una sensibilidad que los predispone en cierta medida a avanzar hacia los objetivos sociales más profundos de la agroecología (pasos 4 y 5 de Gliessman) (Gliessman, 2016).

Sin embargo, es necesario mencionar que existe una diferencia operativa clave entre la agroecología y la agricultura regenerativa: el énfasis en el suelo propio de la regenerativa (Rhodes, 2017). Si bien la agroecología posee referentes brillantes en esta área, como Francis Chaboussou y su teoría de la trofobiosis (Chaboussou, 2005), o Ana María Primavesi y su manejo ecológico del suelo (Primavesi, 1982), la agricultura regenerativa ha logrado "traducir" y profundizar estos conceptos en un enfoque práctico, orientado a resultados rápidos (Rhodes, 2017; Newton *et al.,* 2020; Khangura *et al.,* 2023; Garbisu *et al.,* 2023; Congreves, 2025). Esto último explica en gran medida su rápida adopción por agricultores convencionales que buscan soluciones a su crisis de rentabilidad. Este énfasis ha ido acompañado por el reconocimiento de la importancia de la microbiología de los suelos para su regeneración, lo que ha traído consigo sorprendentes logros que señalan claramente el camino a seguir (Montgomery *et al.,* 2022).

El reconocimiento de estas convergencias, junto con la identificación de brechas conceptuales y operativas, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar el concepto de Regeneración Agroecológica como disciplina integral, la cual busca trascender tanto el debate predominantemente teórico asociado a la agroecología académica como el enfoque de nicho característico de la agricultura regenerativa, situando su praxis en el imperativo de la regeneración microbiológica de los agroecosistemas. La Regeneración Agroecológica se fundamenta en la restauración de la salud del suelo mediante el manejo de la microbiología asociada a los cultivos, con énfasis en la captura de carbono y su incorporación como materia orgánica, así como en la biodegradación, el reciclaje de nutrientes y la mejora de la fertilidad, junto con la reducción de la compactación y la degradación del suelo.

La agricultura regenerativa ha demostrado que la vía más rápida para asegurar la rentabilidad a gran escala y la resiliencia climática pasa por la mejora de la salud del suelo (Rhodes, 2017); sin embargo, para que esta transición sea verdaderamente efectiva, requiere incorporar la profundidad analítica y el enfoque sistémico propio de la agroecología (Wezel *et al.,* 2009). En este sentido, la Regeneración Agroecológica se plantea como un puente conceptual y operativo que integra la rigurosidad científica de la agroecología con la eficiencia productiva de la agricultura regenerativa, anclando la transición hacia una agricultura holística de base ecológica, en la microbiología del agroecosistema como principal motor de cambio, y evitando su subordinación a marcos discursivos de carácter político-ideológico que, en la práctica, han frenado la transición en amplios sectores del sistema agroproductivo (ver, por ejemplo: Rosset y Altieri, 2017).

REVOLUCIÓN MICROBIOLÓGICA

Actualmente, la agricultura ecológica está siendo impulsada por una revolución tecnológica sin precedentes: el auge de los microorganismos eficientes y de los bioinsumos en términos generales (Chouhan et al. 2021; Gupta *et al.,* 2021; Elnahal *et al.,* 2022, Suman *et al.,* 2022). En el centro de esto se encuentra el concepto de Microbioma, entendido como la comunidad de microorganismos que habitan un entorno particular (como la rizosfera o la filósfera) y que son determinantes para la salud de un hospedero, por ejemplo, una planta (Berendsen *et al.,* 2012: Gupta *et al.,* 2021).

En este sentido, investigaciones como las realizadas por Elaine Ingham han sido importantes para explicar cómo los microorganismos son fundamentales en la nutrición de las plantas. Estos liberan nutrientes al suelo a través de la depredación (*e.g.,* protozoos comiendo bacterias) (Clarholm, 1985; Ingham *et al.,* 1985, Ingham 2000; Johansson et al., 2004; Nannipieri et al; 2020; Mitter *et al.,* 2021). La clave reside en la estequiometría ecológica, específicamente en la rela-

ción Carbono:Nitrógeno (C:N). Las bacterias y los hongos tienen una alta concentración de nitrógeno en sus cuerpos (una relación C:N baja, cercana a 3–8:1 para las bacterias y de 5–15:1 para el caso de los hongos). Por el contrario, sus depredadores (protozoos como flagelados y amebas, y nematodos bacterívoros/fungívoros) tienen requerimientos de nitrógeno mucho menores (una relación C:N alta, de 30:1 o más) (Bloem *et al.,* 1988; Bonkowski, 2004; Wang et al, 2009; Nannipieri et al., 2020; Mitter *et al.,* 2021). Por lo tanto, cuando un protozoo consume una bacteria para obtener carbono y energía, ingiere un exceso de nitrógeno que no necesita para su propia estructura (Clarholm, 1985; Sterner y Elser, 2002; Mitter *et al.,* 2021). Para mantener su homeostasis, los depredadores excretan este exceso al medio principalmente en forma de amonio, que es la forma de nitrógeno más asimilable y energéticamente eficiente para las plantas (Clarholm, 1985; Bloom *et al.,* 1992; Mitter *et al.,* 2021; Zayed *et al.,* 2023).

De igual manera, descubrimientos recientes sobre la rizofagia, liderados por James White han revolucionado nuestra comprensión de la nutrición vegetal (White *et al.,* 2018; 2019). Estos descubrimientos muestran que las plantas no son entes pasivos en la absorción de nutrientes (Paungfoo-Lonhienne *et al.,* 2013; Verma *et al.,* 2021; Zhang *et al.,* 2022; Chang *et al.,* 2023). Por el contrario, sus raíces secretan exudados (azúcares, ácidos orgánicos) en la punta de la raíz (meristemo) para atraer bacterias y hongos levaduriformes del suelo (White *et al.,* 2018; 2019; Paungfoo-Lonhienne *et al.,* 2013; Verma *et al.,* 2021; Zhang *et al.,* 2022; Chang *et al.,* 2023). Estos microbios entran en las células de la raíz y una vez dentro, la planta los somete a un bombardeo de especies reactivas de oxígeno**,** como el superóxido (White *et al.,* 2018; 2019). Este ataque oxidativo disuelve las paredes celulares de las bacterias, extrayendo de ellas nutrientes vitales (*e.g.,* nitrógeno, fósforo, micronutrientes). Los protoplastos bacterianos sobrevivientes desencadenan la formación de pelos radiculares (Zhang *et al.,* 2022; Chang *et al.,* 2023). Finalmente, la planta expulsa a las bacterias sobrevivientes a través de la punta de los pelos radicales de vuelta al suelo, donde éstas reforman sus paredes celulares y se alimentan, para luego repetir el ciclo (White *et al.,* 2018; 2019; Paungfoo-Lonhienne *et al.,* 2013; Verma *et al.,* 2021; Zhang *et al.,* 2022; Chang *et al.,* 2023).

No obstante, estos enfoques, aunque valiosos, se centran exclusivamente en las interacciones tróficas. Para una verdadera Regeneración Agroecológica, es necesario incorporar el espectro completo de interacciones ecológicas (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021; Tharanath *et al.,* 2024). En este sentido, vale la pena tomar en cuenta las interacciones amensalistas, como las que ocurren cuando un organismo produce sustancias que inhiben a otros como parte de su metabolismo (Lou *et al.,* 2016, Dang Xuan et al, 2025; Yang *et al.,* 2025). Un ejemplo crucial en la agricultura es la producción de antibióticos por ciertas bacterias (como *Bacillus* spp.) o actinomicetos, que regulan poblaciones de patógenos (Caulier *et al.,* 2019; Newitt *et al.,* 2019; Chepsergon y Moleleki, 2023, Ge *et al.,* 2024). También son importantes los comensalismos, como los que ocurren cuando los organismos descomponedores saprófitos degradan materia orgánica muerta (Crowther *et al.,* 2012; Aguilar-Paredes *et al.,* 2020; Clocchiatti *et al.,* 2020; Maillard *et al.,* 2025). Los descomponedores típicamente no se benefician directamente de la planta viva, pero esta sí lo hace de los subproductos de la actividad de los saprófitos (nutrientes mineralizados). La competencia también juega un rol importante en este sistema. Por ejemplo, hongos como las especies de *Trichoderma* son excelentes colonizadores que compiten por espacio y recursos, desplazando competitivamente a hongos patógenos como *Fusarium* o *Rhizoctonia*, protegiendo así a las plantas de infecciones gracias a la exclusión competitiva de los patógenos (Harman *et al.,* 2004; Martínez-Martínez *et al.,* 2020; Rodríguez y Flores, 2020; Sarrocco *et al.,* 2021; Abbas *et al.,* 2022; Stumme *et al.,* 2025).

El mutualismo es una de las interacciones ecológicas más importantes, tanto en la agricultura alternativa (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bende *et al.,* 2016; Sharma *et al.,* 2025) como en los ecosistemas en general (Vandermeer y Goldberg, 2003). Un ejemplo paradigmático son los hongos formadores de micorrizas. Estos no solo extienden el sistema radical de las plantas, permitiendo el acceso a agua y nutrientes que de otro modo serían inalcanzables (Hou *et al.,* 2021; Alayafi *et al.,* 2025), sino que median una verdadera red de comunicación subterránea (llamada *Wood Wide Web*) (Simard, 2012; Simard *et al.,* 2012; Figueiredo *et al.,* 2021; Merckx *et al.,* 2024; Rillig *et al.,* 2024). Existe evidencia sólida de que las plantas utilizan esta red para intercambiar carbohidratos e incluso para transmitir señales de alerta sobre ataques de insectos fitófagos, permitiendo que las plantas vecinas activen sus defensas antes de ser atacadas (Gorzelak *et al.,* 2015; Figueiredo *et al.,* 2021: Scott *et al.,* 2025).

Adicionalmente, hay que mencionar el profundo impacto que han tenido los endófitos en el manejo ecológico de plagas (Hardoim *et al.,* 2008; Compant *et al.,* 2010; Hardoim *et al.,* 2015; Khare et al, 2018). Estos son microorganismos que viven dentro de los tejidos vegetales sin causar daño y que les ofrecen beneficios extraordinarios a las plantas: inducen resistencia sistémica, fijan nitrógeno atmosférico directamente dentro de la planta, producen fitohormonas que estimulan el crecimiento y la tolerancia al estrés salino o hídrico (Hardoim *et al.,* 2015; Müller *et al.,* 2016; Santoyo *et al.,* 2016; Khare et al, 2018; Barra-Bucarei *et al.,* 2019; 2020; Trivedi *et al.,* 2020; Kuma *et al.,* 2024). La inte-

gración funcional entre la planta y su microbioma es tan estrecha, que la microbiota de la filósfera puede modular el crecimiento de cada hoja mediante la represión de redes genéticas asociadas a la defensa. Este mecanismo permite que cada hoja optimice el compromiso entre defensa y desarrollo, ajustando su funcionamiento en respuesta a condiciones ambientales fluctuantes (Custódio *et al.,* 2025).

También es crucial entender cómo se comunican los microbios, para desarrollar estrategias de manejo que tomen esto en cuenta (Venturi y Keel, 2016). En esta área, un campo activo de investigación involucra al *Quorum Sensing,* un mecanismo de comunicación celular dependiente de la densidad poblacional, basado en la secreción moléculas señalizadoras (autoinductores). Cuando la concentración de estas moléculas alcanza un umbral crítico (el "quórum"), las bacterias activan, por ejemplo, genes de virulencia simultáneamente, atacando a la planta en masa para abrumar sus sistemas de defensa (Loh *et al.,* 2002; González y Marketon, 2003; Hartmann y Schikora, 2012; Kırtel *et al.,* 2019; Kamath et al, 2023).

Otro concepto emergente y fundamental para el manejo del agroecosistema es el de la memoria microbiana externa, también conocido como legado en el suelo (*soil legacy*) (Kostenko etal., 2012, Allsup *et al.,* 2023). Los microorganismos tienen la capacidad de almacenar 'recuerdos' no a nivel individual, sino a través de la modificación colectiva y persistente de su entorno biofísico (*e.g.,* alteraciones de pH, cambios en la composición del carbono orgánico, o formación de matrices de biopelículas) (Arunrat *et al.,* 2025). Este ambiente modificado se convierte en una forma de herencia ecológica o legado, que perdura en el suelo tras el cese de la actividad microbiana original (Allsup *et al.,* 2023; Arunrat *et al.,* 2025). Dicho legado influye de manera determinante en cómo las comunidades microbianas futuras se ensamblan y funcionan, favoreciendo o inhibiendo ciertos gremios y, por ende, impactando directamente en la salud y resiliencia del vegetal (Hartmann *et al.,* 2015; de Vries *et al.,* 2018; Mariotte et al, 2018; Rolli *et al.,* 2021; Allsup *et al.,* 2023; Yang *et al.,* 2023; Arunrat *et al.,* 2025).

Para lograr una comprensión profunda de estos sistemas, es necesario ir más allá de las interacciones ecológicas aisladas y abordar la arquitectura funcional de la red ecológica asociada al agroecosistema (Griffon y Hernández, 2014; 2019; Griffon y Rodríguez, 2017; Griffon *et al.,* 2021). El análisis teórico demuestra que los agroecosistemas resilientes se caracterizan por una alta proporción de interacciones positivas, como el mutualismo. Esta, junto con interacciones a menudo subestimadas como el comensalismo y el amensalismo, son fundamentales para el correcto funcionamiento del sistema a largo plazo (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021). Otro aspecto crucial son las interacciones condicionales, que son aquellas en las que la naturaleza del vínculo ecológico se altera (por ejemplo, de mutualismo a competencia) en función de condiciones ambientales, como la disponibilidad de nutrientes, el nivel de estrés hídrico o la presencia de otras especies (Hernández, 2021). En este sentido, los modelos matemáticos confirman que esta complejidad biológica promueve la autorregulación de las densidades poblacionales, evitando las explosiones de plagas y enfermedades (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021).

En definitiva, este conjunto de evidencias muestra con claridad que la salud de la planta no es un estado que depende únicamente del individuo, sino una propiedad emergente del funcionamiento de esta compleja red ecológica. Por lo tanto, esta red es un objeto de manejo central para el éxito de la agricultura con base en la Regeneración Agroecológica.

HOLOBIONTE

En estos momentos presenciamos una transformación epistemológica en las ciencias biológicas gracias al concepto de Holobionte (Margulis, 2002; Margulis y Sagan, 2003, Gilbert *et al.,* 2014; Theis *et al.,* 2016; Roughgarden, 2020; 2023; Schneider, 2021). Este término cuestiona el concepto de individuo, como un organismo aislado y pone el énfasis en la unidad funcional compuesta por un hospedero (*e.g.,* la planta) y todos sus microorganismos asociados (*i.e.,* su microbioma) (Gilbert *et al.,* 2014; Theis *et al.,* 2016; Roughgarden, 2020; 2023; Schneider, 2021). Esta asociación simbiótica funciona como un sistema integrado, donde tanto el hospedador como sus microorganismos contribuyen conjuntamente a la fisiología, el desarrollo, la salud y la adaptación del conjunto (Gilbert *et al.,* 2014; Roughgarden, 2020; 2023). El concepto de Holobionte resalta la interdependencia ecológica y evolutiva entre el hospedador y su microbioma, reconociendo que la identidad y función del hospedador no pueden comprenderse completamente sin considerar su comunidad microbiana asociada (Gilbert *et al.,* 2014; Roughgarden, 2020; 2023). En este sentido, de manera más específica, puede afirmarse que el bienestar de la planta es, en gran medida, una propiedad emergente de las interacciones entre los distintos componentes de la red ecológica que conforma al holobionte (Schneider, 2021).

La integración del manejo del microbioma en la agricultura ecológica marca una transición fundamental, al permitir redefinir los esquemas de manejo productivo bajo el concepto de Holobionte (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). Esta perspectiva optimiza la nutrición vegetal al establecer una interfaz ecológica que no solo facilita la solubilización de minerales como el fósforo, el potasio y el zinc, así como la fijación biológica de nitrógeno, sino que también dinamiza los ciclos tróficos del suelo.

Más allá de la nutrición, en este contexto el microbioma confiere una "inmunidad ecológica" y una plasticidad adaptativa indispensable ante el cambio climático (Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-Gonzalez *et al.,* 2025; Weckwerth *et al.,* 2025). Esta bio-protección se ejerce a través de la competencia por nicho entre antagonistas, la producción amensalista de antibióticos, así como de estrategias avanzadas como el *Quorum Quenching*, que interrumpe la comunicación química de los patógenos para inhibir su virulencia, además de inducir resistencia sistémica (*priming*) en el hospedero (Harman *et al.,* 2004; Kloeppe *et al.,* 2004; Pieterse *et al.,* 2014; Mauch-Mani *et al.,* 2017Y; Vassileva *et al.,* 2020; Yua *et al.,* 2020; Alfiky y Weisskopf, 2021; Sinha *et al*., 2022; Kamath et al, 2023; Heuer *et al.,* 2026). Simultáneamente, la interacción con endófitos y microorganismos rizosféricos modula la respuesta hormonal vegetal (por ejemplo, vía ACC desaminasa y auxinas) mitigando el estrés abiótico por salinidad o sequía, lo que permite diseñar y manejar agroecosistemas adaptados a los grandes retos que impone el cambio climático (Vassileva *et al.,* 2020; Sinha *et al*., 2022).

Adoptar el concepto de Holobionte permite también abordar el "elefante en la habitación" de la agricultura ecológica: la evolución (Murphy *et al.,* 2004; Phillips y Wolfe, 2005; Ceccarelli, 2009; Ceccarelli y Grando, 2020; Roughgarden, 2020; 2023). Por ejemplo, hasta ahora, el mejoramiento genético se ha centrado exclusivamente en el genoma de la planta (Ceccarelli, 2009; Raggi *et al.,* 2017; Ceccarelli y Grando, 2020). Sin embargo, bajo este nuevo paradigma, debemos hablar del mejoramiento genético del Holobionte (Roughgarden, 2020; 2023). Esto implica considerar la co-evolución entre la planta y sus socios microbianos. Para entender esto teóricamente (Ceccarelli, 2009), debemos revisitar el Teorema Fundamental de la Selección Natural propuesto por Fisher, que establece que la tasa de aumento en la aptitud (*fitness*) de una población es proporcional a su varianza genética en aptitud (Fisher, 1999). Cuando se cumple este teorema, se puede concebir la acción de la selección natural como un proceso de optimización del *fitness* de la población (Price, 1972; Edwards, 1994; Baez, 2021; Jaćimović, 2023). Este teorema en principio aplica a poblaciones de una especie, pero existen versiones ecológicas desarrolladas por León y Charlesworth (1978), que incluyen interacciones ecológicas como la competencia, la depredación y el mutualismo. Más recientemente, Joan Roughgarden ha propuesto modelos específicos para la evolución del Holobionte (Roughgarden, 2020, 2023). Sus resultados sugieren que la selección natural no actúa solo sobre el genoma del hospedero, sino sobre el "hologenoma" (la suma de genes del hospedero y sus microbios). Roughgarden demuestra que la selección a nivel de Holobionte puede favorecer rasgos cooperativos y mutualistas que serían descartados por la selección individual clásica (Roughgarden, 2023), lo que señala mecanismos específicos para la evolución del Holobionte.

En la práctica, la evolución del Holobionte en un agroecosistema puede entenderse como la versión microbiológica de la agricultura natural de Masanobu Fukuoka (Fukuoka, 2013). Al igual que Fukuoka abogaba por el "no hacer" para permitir que la naturaleza encontrara su equilibrio, facilitar la evolución del Holobionte implica crear las condiciones para que la co-adaptación planta-microbios ocurra sin interrupciones químicas drásticas (Gilbert *et al.,* 2014; Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Theis *et al.,* 2016; Roughgarden, 2020; 2023; Schneider, 2021 Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025; Heuer *et al.,* 2026). La clave del éxito en la Regeneración Agroecológica reside, por tanto, en asegurar que las fuerzas evolutivas dispongan de la diversidad biológica y las condiciones ambientales necesarias para incrementar el *fitness* del Holobionte. No se trata solo de nutrir, regar, gestionar y proteger a las plantas, sino de facilitar la co-evolución del cultivo y su microbioma para que el sistema, como un todo, se vuelva más productivo, resiliente y autónomo (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025; Heuer *et al.,* 2026).

DIAGNÓSTICO HOLÍSTICO BASADO EN EL HOLOBIONTE

El enfoque convencional de la agricultura tiende a reducir la complejidad del sistema a la planta individual, asumiéndola como una entidad aislada que requiere insumos externos (Griffon, 2008). Sin embargo, la realidad biológica de un agroecosistema es radicalmente distinta. Una planta nunca está sola; es el componente más visible de un sistema biológico mucho más vasto y en gran medida intangible (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Saikkonen *et al.,* 2020; Trivedi *et al.,* 2020). La Regeneración Agroecológica exige un cambio en la percepción, obligándonos a mirar más allá de lo evidente y a reconocer la red invisible de interacciones que sostiene la vida vegetal (Schneider, 2021).

Esta red está compuesta, por millones de microorganismos que viven en estrecha simbiosis con la planta, formando un Holobionte (Gilbert *et al.,* 2014; Schneider, 2021). En este contexto, la salud y la resistencia del cultivo no son propiedades inherentes a su genoma individual, sino cualidades emergentes del hologenoma completo (Gilbert *et al.,* 2014; Theis *et al.,* 2016; Roughgarden, 2020; 2023; Schneider, 2021). El diagnóstico predial en este nuevo paradigma nos obliga a abandonar la lógica de forzar la producción mediante insumos químicos y se centra, en cambio, en la restauración de las relaciones biológicas que permiten al Holobionte prosperar de manera adecuada (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Saikkonen *et al.,* 2020; Trivedi *et al.,* 2020).

Para llevar este concepto a la práctica es necesario iniciar el proceso con un diagnóstico holístico del sistema (Capra, 1998; 2002; 2014). Este diagnóstico va más allá de un simple análisis físico-químico, pasa a identificar la composición funcional de la comunidad biológica, haciendo énfasis en qué microorganismos clave están presentes, cuáles están ausentes, y cómo se están relacionando entre sí y con el cultivo (patrones de mutualismo, competencia o depredación) (Saikkonen *et al.,* 2020; Trivedi *et al.,* 2020). A partir de esta cartografía microbiana, se pueden diseñar estrategias específicas que se centran en regenerar las relaciones biológicas (Venturi y Keel, 2016; Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021; Tharanath *et al.,* 2024). Estas incluyen, desde la producción *in situ* de bioinsumos y el uso de microorganismos eficientes específicos, hasta la introducción de cultivos de cobertura y plantas nativas que actúen como estimulantes directos de la microbiota benéfica. El objetivo final es transformar el microbioma y el cultivo en un sistema más resiliente al estrés climático, así como a plagas y enfermedades, orientado a la producción de alimentos de calidad (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Venturi y Keel, 2016; Saikkonen *et al.,* 2020; Trivedi *et al.,* 2020).

De esta manera el Diagnóstico Holístico basado en el Holobionte se establece como una herramienta de gestión esencial que supera la visión reduccionista, al evaluar la salud del agroecosistema a través de la integración de múltiples dimensiones (Capra, 1998; 2002; 2014). Para lograr esta visión integral, el diagnóstico se estructura en cuatro componentes interconectados: el Análisis Microbiano, el Análisis Físico-Químico de Suelo, el Análisis Savia y el Análisis Ecológico Macro.

El análisis microbiano es fundamental, ya que permite mapear el componente funcional del holobionte mediante la evaluación de parámetros clave como la biomasa microbiana y la relación hongos/bacterias. Este último es un indicador de la madurez ecológica del sistema, dado que se asocia con la etapa de la sucesión ecológica en la que este se encuentra (Ingham, 2000; Nannipieri et al., 2020; Mitter *et al.,* 2021). Cabe recordar que la sucesión ecológica es un proceso dinámico de recambio de especies que ocurre en un ecosistema luego de una perturbación, y cuyas etapas pueden dividirse, de manera general, en tempranas, intermedias y tardías; en los suelos, cada una de estas etapas se caracteriza por relaciones hongos/bacterias distintas (aumentado la proporción de hongos y disminuyendo la de bacterias a medida que avanza la sucesión) (Ingham, 2000; Nannipieri et al., 2020). También se evalúa el reciclaje de nutrientes (vía protozoos y nemátodos) (Ingham, 2000; Nannipieri et al., 2020; Mitter *et al.,* 2021) y las asociaciones simbióticas esenciales como las micorrizas, las cuales son críticas para la resiliencia del sistema (Simard, 2012; Simard *et al.,* 2012; Figueiredo *et al.,* 2021; Hou *et al.,* 2021; Merckx *et al.,* 2024; Rillig *et al.,* 2024; Alayafi *et al.,* 2025).

Complementariamente, el Análisis Físico-Químico define el contexto limitante, identificando las condiciones edáficas que restringen la función microbiana, como la densidad aparente, la materia orgánica y la composición de macronutrientes (totales, disponibles e intercambiables), micronutrientes, entre otros (Li *et al.,* 2002; Trivedi *et al.,* 2020; Lal, 2025). El análisis ecológico macro añade una dimensión estructural al diagnóstico, cuantificando la biodiversidad visible (como artrópodos benéficos y lombrices), así como la presencia de plagas, enfermedades y malezas. Adicionalmente, se evalúa la calidad del hábitat, incluyendo la cobertura vegetal, junto con propiedades físicas del suelo tales como la porosidad, la agregación, la infiltración y el grado de compactación (Vázquez *et al.,* 2014), así como herramientas de teledetección. Finalmente, el Análisis de Savia actúa como el validador del desempeño del hospedero, reflejando el estado nutricional de la planta como resultado final de las interacciones del Holobionte (Esteves *et al.,* 2021). La integración de estos cuatro pilares permite diagnosticar la causa raíz de los problemas, en lugar de limitarse al tratamiento de los síntomas, como deficiencias foliares o episodios de plagas. De este modo, se facilita una gestión orientada a la regeneración de las relaciones y funciones biológicas, permitiendo que el resto de los componentes del sistema converjan hacia su estado óptimo (Vandermeer y Perfecto, 2018).

La interpretación del diagnóstico holístico no es directa o lineal. Por ejemplo, un valor alto de un nutriente en el suelo no garantiza su asimilación por la planta, ya que su disponibilidad puede estar mediada por la actividad biológica e interacciones fisicoquímicas complejas (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). Por ello, el diagnóstico requiere una interpretación integral de todos sus componentes.

Un ejemplo paradigmático de esta complejidad es el antagonismo nutricional, donde la alta concentración de un elemento en el suelo o en la savia de la planta puede inhibir la absorción de otro (Rietra *et al.,* 2017). Por ejemplo, en el Análisis Savia, si el Calcio y Magnesio se encuentra en niveles excesivamente altos, a menudo se observa una deficiencia inducida de Potasio en la planta, incluso si este último está disponible en el suelo (Marschner, 2012; Rietra *et al.,* 2017). Esto se debe a que ambos son cationes con afinidad competitiva por los mismos sitios de absorción radical, limitando la entrada de los menos concentrados.

La interpretación integral se enriquece al sumar la tecnología de teledetección, que es parte integral Análisis Ecológico Macro. En el Diagnóstico Holistico, las imágenes NDVI (Indice de Vegetación de de Diferencia Normalizada) cumplen un rol central como integrador espacial de los análisis Microbiano, Físico-Químico y

Foliar (Huang *et al.,* 2021). Por ejemplo, un mapa NDVI puede revelar sectores con bajo vigor vegetativo persistente. Al contrastar esas zonas con el Análisis Físico-Químico, pudiera observarse que los niveles totales de nitrógeno y fósforo en el suelo son adecuados, descartando una deficiencia química primaria. Sin embargo, el Análisis Foliar de plantas provenientes de esas áreas puede mostrar concentraciones subóptimas de ambos nutrientes, indicando una limitación en la absorción. En este caso, el Análisis Microbiano permite cerrar el diagnóstico, por ejemplo, al mostrar una baja actividad de comunidades clave involucradas en la mineralización del nitrógeno y la solubilización del fósforo, asociada a condiciones de compactación y baja aireación del suelo (Li *et al.,* 2002; Marschner, 2012). En este contexto, el NDVI no sólo identifica el síntoma (menor vigor), sino que guía la integración de evidencias para distinguir entre un problema de disponibilidad biológica y uno de oferta química, permitiendo un diagnóstico causal y espacialmente explícito que difícilmente emergería de análisis aislados (Samborski *et al.,* 2009; Segarra et al., 2020).

La lectura integrada de los cuatro componentes del análisis (donde el análisis físico-químico revela el potencial de fertilidad, el análisis microbiano la funcionalidad biótica microscópica, el análisis foliar la condición nutricional del cultivo y el análisis ecológico macro la funcionalidad biótica macroscópica) permite identificar las causas raíz de los problemas productivos. De este modo, el Diagnóstico Holístico trasciende el abordaje del síntoma y se centra en la funcionalidad del sistema, ofreciendo soluciones reales y duraderas.

ESQUEMAS DE MANEJO EN REGENERACIÓN AGROECOLOGÍA

Luego del Diagnóstico Holístico inicial, la siguiente fase es la elaboración de una hoja de ruta para abordar los problemas detectados. Es precisamente en esta etapa donde se manifiesta una de las principales fortalezas de la Regeneración Agroecológica, la cual reside en la aplicación de un conjunto de principios de base científica sólida y de carácter instrumental, que orientan el manejo del agroecosistema y la restauración de su funcionalidad ecológica. Estos principios, originalmente desarrollados en el marco de la agroecología (Gliessman, 1998; Altieri y Nicholls, 2000), actúan como guías de manejo y no como valores éticos transversales, una distinción necesaria para evitar confusiones derivadas de la incorporación de elementos pertenecientes a otros planos analíticos, como, por ejemplo, aspiraciones de orden social (Griffon, 2025). Las distintas propuestas de principios coinciden en un conjunto que son instrumentales, fundamentales y compartidos por todas (ver Gliessman, 1998; Altieri y Nicholls, 2000; FAO, 2018; Wezel *et al.,* 2020).

En este sentido, la Regeneración Agroecológica se articula en torno a seis principios operativos (Griffon, 2025): diversificación del agroecosistema, adaptación a las condiciones locales, balance de flujos de energía y nutrientes, conservación de los recursos, fortalecimiento de interacciones sinérgicas y manejo holístico del sistema. Bajo estos principios es posible diseñar e implementar planes de Regeneración Agroecológica, orientados a recuperar la funcionalidad ecológica del agroecosistema, potenciando su viabilidad productiva (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-Gonzalez *et al.,* 2025). En particular, la adaptación a las condiciones locales incluye la utilización de microorganismos autóctonos adaptados al sitio, fortaleciendo la resiliencia del sistema y la eficiencia de los procesos ecológicos (Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025).

El sentido de estos principios se comprende plenamente al analizar las características de los agroecosistemas, entendidos como ecosistemas permanentemente perturbados por la acción humana (Vandermeer, 1992; Odum y Sarmiento, 1998). Entre estas perturbaciones se incluyen (Griffon, 2025): la manipulación intencionada del sistema para mantenerlo en estados tempranos de sucesión ecológica, la reducción cíclica de la biodiversidad asociada a las labores agrícolas, la selección antrópica de las especies presentes (las cuales no necesariamente están adaptadas a las condiciones locales), la alteración de los flujos de energía y nutrientes mediante la aplicación de insumos externos y la extracción de biomasa durante la cosecha, así como la simplificación estructural de la red ecológica, lo que reduce la redundancia funcional y la diversidad de las comunidades microbianas (Altieri y Nicholls, 2000; Vandermeer y Perfecto, 1995; Gliessman, 1998; Griffon, 2008; 2025).

En este contexto, los principios de la Regeneración Agroecológica constituyen estrategias para atenuar los efectos de dichas perturbaciones (Gliessman, 1998; Altieri y Nicholls, 2000): la diversificación y la adaptación local, incluida la incorporación de microorganismos adaptados al sitio, contrarrestan la pérdida de biodiversidad y promueven un microbioma más resiliente; el balance de flujos y la conservación de recursos reducen los desajustes energéticos y nutricionales, a la vez que promueven el reciclaje y la circularidad en el sistema; el fortalecimiento de interacciones sinérgicas promueve redes ecológicas complejas y mecanismos de autorregulación de las densidades poblacionales de organismos fitófagos; finalmente, el manejo holístico reconoce al agroecosistema como un sistema complejo cuyas propiedades emergen de la interacción entre sus componentes, incluidos los microbianos, y no de su manejo aislado (Gliessman, 1998; Altieri y Nicholls, 2000; Griffon y Hernández, 2019).

Si bien estos principios poseen validez general, su interpretación y traducción en prácticas de manejo y

en planes de Regeneración Agroecológica integrales son necesariamente contextuales (Gliessman, 2016). En este sentido, los principios funcionan como una brújula conceptual que orienta el diseño y la implementación de estrategias de manejo, cuya correcta aplicación depende de un análisis ecológico detallado de las particularidades de cada agroecosistema (Altieri y Nicholls, 2000; Vandermeer y Perfecto, 2017) y de su microbioma asociado, para lo cual el Diagnostico Holístico es un insumo fundamental.

ESTUDIO DE CASO

Para finalizar, se presentan los resultados de la aplicación del Diagnóstico Holístico basado en el concepto de Holobionte a 20 unidades agrícolas ubicadas en la región del Maule (Chile). Estas unidades incluyen una amplia diversidad de cultivos, entre los que se encuentran arándanos, cerezos, olivos, paltos, frutillas, frambuesos, manzanos, perales, avellanos europeos, nogales, kiwis y vides. Todas las unidades agrícolas, con excepción de la llamada número 3, corresponden a sistemas de producción convencionales, aunque muchas han incorporado prácticas de manejo regenerativo, como el uso de cultivos de cobertura. Por su parte, la unidad agrícola 3 se caracteriza por operar bajo un sistema de manejo regenerativo. Por limitaciones de espacio, se muestran únicamente los resultados del componente funcional del Diagnóstico Holístico (en el Anexo 1 se presentan los detalles de las metodologías empleadas).

En la Figura 2 se presentan los resultados integrados del análisis microbiano y del análisis ecológico macro (*i.e.,* componente funcional), sintetizados mediante un mapa de calor (Heatmap) con un esquema de color tipo semáforo (Henao *et al.,* 2017). Este permite comparar el estado funcional de los principales componentes biológicos de los agroecosistemas evaluados. Con excepción de la unidad agrícola 3, la mayoría de las unidades presentan múltiples categorías clasificadas en color rojo, lo que indica condiciones funcionales inadecuadas en componentes clave del sistema. Estos resultados sugieren una disrupción en los procesos ecológicos asociados al Holobionte vegetal (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Saikkonen *et al.,* 2020; Trivedi *et al.,* 2020), particularmente en lo relativo a la estructura y funcionalidad de las comunidades microbianas y a su integración con el contexto ecológico macro. En conjunto, el patrón observado es consistente con sistemas bajo manejo convencional, donde las prácticas empleadas tienden a simplificar las interacciones biológicas y a comprometer la funcionalidad productiva a largo plazo del agroecosistema (Chouhan et al. 2021; Montgomery *et al.,* 2022).

En la Figura 3 se muestra la proporción relativa de biomasa bacteriana y fúngica en cada una de las unidades agrícolas evaluadas. En todos los casos se observa una marcada dominancia de la biomasa bacteriana, con una representación fúngica comparativamente reducida. Este patrón es característico de sistemas edáficos perturbados, en los cuales la sucesión ecológica microbiana se encuentra en etapas tempranas (Odum, 1969; Ingham, 2000; Moore *et al.,* 2005; Lavelle *et al.,* 2016; Nannipieri et al., 2020; Mitter *et al.,* 2021). Esto se observa de igual manera en el sistema bajo manejo regenerativo. En este sentido, este caso constituye un ejemplo puntual de una de las limitaciones que se han señalado de la agricultura regenerativa: la necesidad de fortalecer la articulación de las prácticas de manejo con evidencia científica generada a escala predial. También nos indica como la Regeneración Agroecológica permite subsanar esta situación mediante el Diagnostico Holístico.

Desde una perspectiva funcional, estos resultados muestran una estructura del microbioma del suelo poco compleja, con capacidad limitada para sostener procesos ecológicos propios de estados sucesionales más avanzados (Coleman *et al.,* 1994; Lavelle *et al.,* 2016, Chouhan et al. 2021). Diversos trabajos han mostrado que los ecosistemas terrestres más productivos, estables y eficientes en el uso de recursos corresponden a etapas tardías de la sucesión ecológica, donde predominan redes tróficas más complejas y suelos con comunidades microbianas dominadas por hongos (Odum, 1969; Ingham, 2000; Moore *et al.,* 2005; Lavelle *et al.,* 2016; Nannipieri et al., 2020; Mitter *et al.,* 2021).

En este contexto, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de implementar estrategias de manejo orientadas a que los agroecosistemas emulen las características funcionales de suelos en sucesión avanzada, con énfasis en el incremento de la relación hongos:bacterias (Ingham, 2000; Nannipieri et al., 2020). En sistemas edáficos que se encuentran en etapas avanzadas de sucesión ecológica, la dominancia fúngica contribuye a una mayor estabilidad estructural del suelo, a una mayor eficiencia en la biodegradación de la materia orgánica y a una mayor resiliencia del agroecosistema en su conjunto (Coleman *et al.,* 1994; Ingham, 2000; Lavelle *et al.,* 2016; Nannipieri et al., 2020).

Con el fin de sintetizar elementos claves de la Regeneración Agroecológica, proponemos el término EcoBauplan para designar el patrón de estructura y función recurrente que define la arquitectura básica de un grupo de agroecosistemas. Al igual que en morfología evolutiva, el termino Bauplan agrupa rasgos anatómicos y de desarrollo comunes entre taxones (Hall, 1992; Willmore, 2012;), el EcoBauplan integra la presencia de gremios funcionales, tipos de interacciones particulares y topologías básicas de la red ecológica que se repiten entre diferentes agroecosistemas (Brussaard, 1998, Lecca *et al.,* 2016; Meyer *et al.,* 2020). El EcoBauplan admite particularices: la identidad taxonómica de las especies dentro de cada gremio puede cambiar, pero

la función y la estructura general del sistema se conservan. Esta herramienta conceptual es útil para comparar, diagnosticar y diseñar agroecosistemas porque permite distinguir entre la identidad taxonómica específica (variable) y la organización funcional conservada (esqueleto). El EcoBauplan identifica múltiples casos del sistema, pese a la variación de especies concretas, clima o manejo. Incluye (a) la presencia de gremios funcionales (polinizadores, descomponedores, fijadores de N, etc.), (b) un conjunto de interacciones esenciales (polinización, depredación, competencia, etc.) y (c) propiedades de la red ecológica (modularidad, conectividad, motivos, etc.) que se repiten como patrones entre las diferentes variantes (Brussaard, 1998, Lecca *et al.,* 2016; Meyer et al, 2020).

En la Figura 4 se muestra una representación idealizada (EcoBauplan) de las interacciones ecológicas entre los distintos componentes de un agroecosistema asociados al suelo, bajo un manejo de Regeneración Agroecológica exitoso (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et*

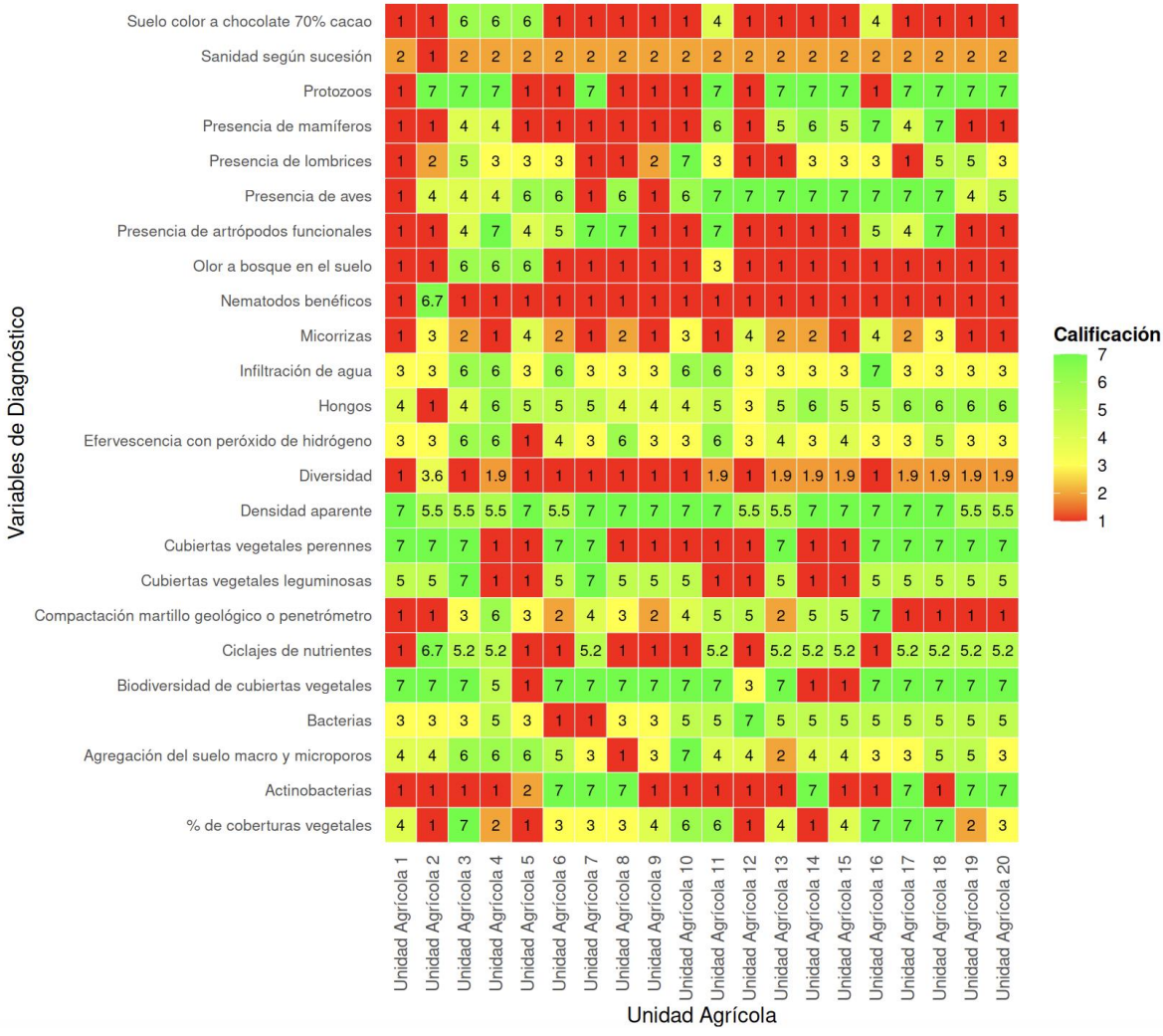


Figura 2. Resultados integrados de análisis microbiano y análisis ecológico macro. Los resultados están clasificados en escala del 1 al 7. Donde 1 es el peor valor y 7 el mejor. La conversión de los valores de campo a la escala del 1 al 7, ha sido efectuada a partir de evidencia de campo y de la siguiente bibliografía: Clarholm, 1985; Ingham *et al.,* 1985, Ingham 2000; Johansson et al., 2004; Nannipieri et al; 2020; Figueiredo *et al.,* 2021; Mitter *et al.,* 2021; Hou *et al.,* 2021; Merckx *et al.,* 2024; Rillig *et al.,* 2024 Alayafi *et al.,* 2025 (ver Anexo 1).

Figure 2. Integrated results of microbial and macroecological analyses. Results are classified on a scale from 1 to 7, where 1 represents the poorest condition and 7 the best. The conversion of field measurements to the 1–7 scale was based on field evidence and the following literature: Clarholm, 1985; Ingham *et al.,* 1985; Ingham, 2000; Johansson *et al.,* 2004; Nannipieri *et al*., 2020; Figueiredo *et al.,* 2021; Mitter *et al*., 2021; Hou *et al.,* 2021; Merckx *et al*., 2024; Rillig *et al.,* 2024; Alayafi *et al*., 2025 (see Appendix 1).

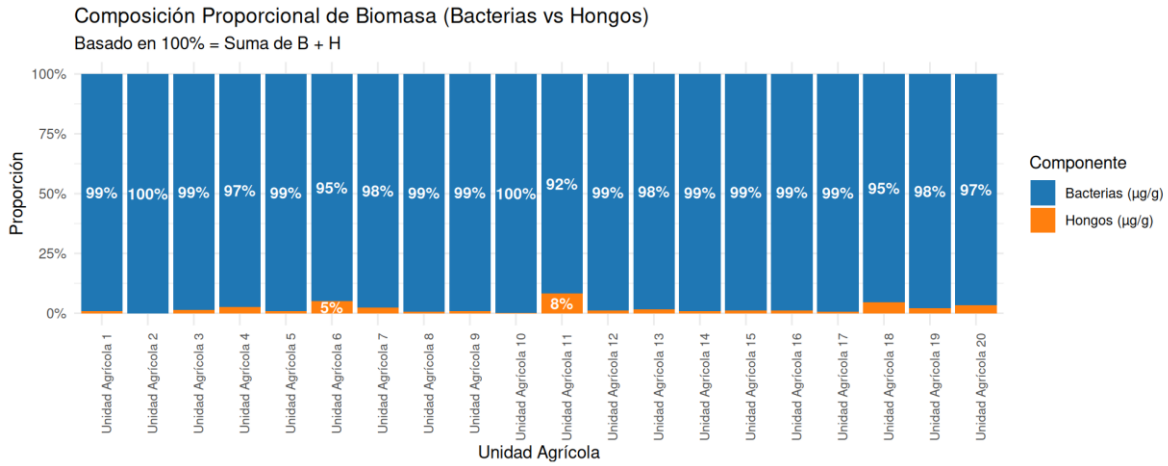


Figura 3. Proporción relativa de biomasa bacteriana y fúngica en las diferentes unidades agrícolas evaluadas.

Figure 3. Relative proportions of bacterial and fungal biomass across the agricultural units evaluated.

al., 2021). Es un ejemplo de un suelo supresivo, es decir, un suelo cuyas propiedades biológicas y ecológicas reducen la probabilidad de establecimiento, desarrollo y propagación de enfermedades. La figura describe una red ecológica conceptual, en la cual los nodos de color verde corresponden a los componentes del holobionte vegetal, mientras que los nodos de color lila representan otros elementos de la biodiversidad asociados al agroecosistema (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021). El tamaño de los nodos es proporcional a su abundancia relativa, de modo que los nodos de mayor tamaño indican mayores abundancias, mientras que los nodos de menor tamaño representan abundancias reducidas, con la excepción del nodo denominado planta, que se presenta de gran tamaño para facilitar su identificación. Los colores de los vínculos indican el tipo de interacción ecológica entre los nodos (ver Tabla 1 para una descripción ecológica de los vínculos).

En la red idealizada presentada en la Figura 4 se observa que los componentes que cumplen funciones ecológicas positivas para el correcto funcionamiento del agroecosistema se encuentran representados por nodos de gran tamaño, mientras que aquellos con efectos perjudiciales muestran bajas abundancias. Asimismo, la estructura de la red presenta un gran número de interacciones positivas (mutualismos y comensalismos), que benefician al hospedero vegetal (Griffon y Hernández, 2019; Griffon *et al.,* 2021).

Desde la perspectiva de la teoría de redes ecológicas, la Figura 4 representa un estado funcional altamente organizado del agroecosistema, caracterizado por una red de interacciones compleja, modular y dominada por vínculos positivos (la densidad de la red es 0,12, su modularidad Walktrap es 0,34 y el 45% de sus vínculos son comensalismos y mutualismos) (Pocock *et al.,* 2012; Griffon y Hernández, 2019; Mujtara *et al.,* 2019; Valverde *et al.*, 2020; Griffon *et al.,* 2021). En este contexto, la alta conectividad entre el hospedero y los distintos elementos del sistema, favorece la redundancia funcional y la distribución de flujos de energía, materia e información a través de la red (la centralidad relativa del nodo planta en la red es 0,25) (Griffon, 2008; Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). Estas propiedades estructurales son fundamentales para la resiliencia ecológica del agroecosistema frente a perturbaciones externas (Griffon y Hernández, 2019). Sin embargo, es importante destacar que, al tratarse de una red conceptual de referencia (idealizada), los valores de sus métricas no deben interpretarse de manera absoluta, sino únicamente como una ilustración de sus propiedades estructurales.

El predominio de mutualismos y comensalismos, reflejado en la abundancia relativa de vínculos funcionalmente beneficiosos, contribuye a amortiguar los efectos de las perturbaciones, mientras que los vínculos tróficos facilitan procesos de autorregulación, como el control biológico, así como el reciclado eficiente de nutrientes (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Griffon y Hernández, 2019; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-Gonzalez *et al.,* 2025). Desde esta óptica, la red idealizada ilustra un sistema ubicado en un dominio de atracción deseable (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Griffon *et al.,* 2021; Portal-González *et al.,* 2025), en el que las interacciones positivas refuerzan la capacidad del agroecosistema para mantener su funcionalidad y reorganizarse tras eventos de estrés. En contraste, las redes simplificadas, con baja conectividad y pocos tipos de interacciones, tienden a exhibir una menor resiliencia y una mayor probabilidad de transiciones abruptas hacia estados indeseables (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Griffon *et al.,* 2021; Portal-Gonzalez *et al.,* 2025).

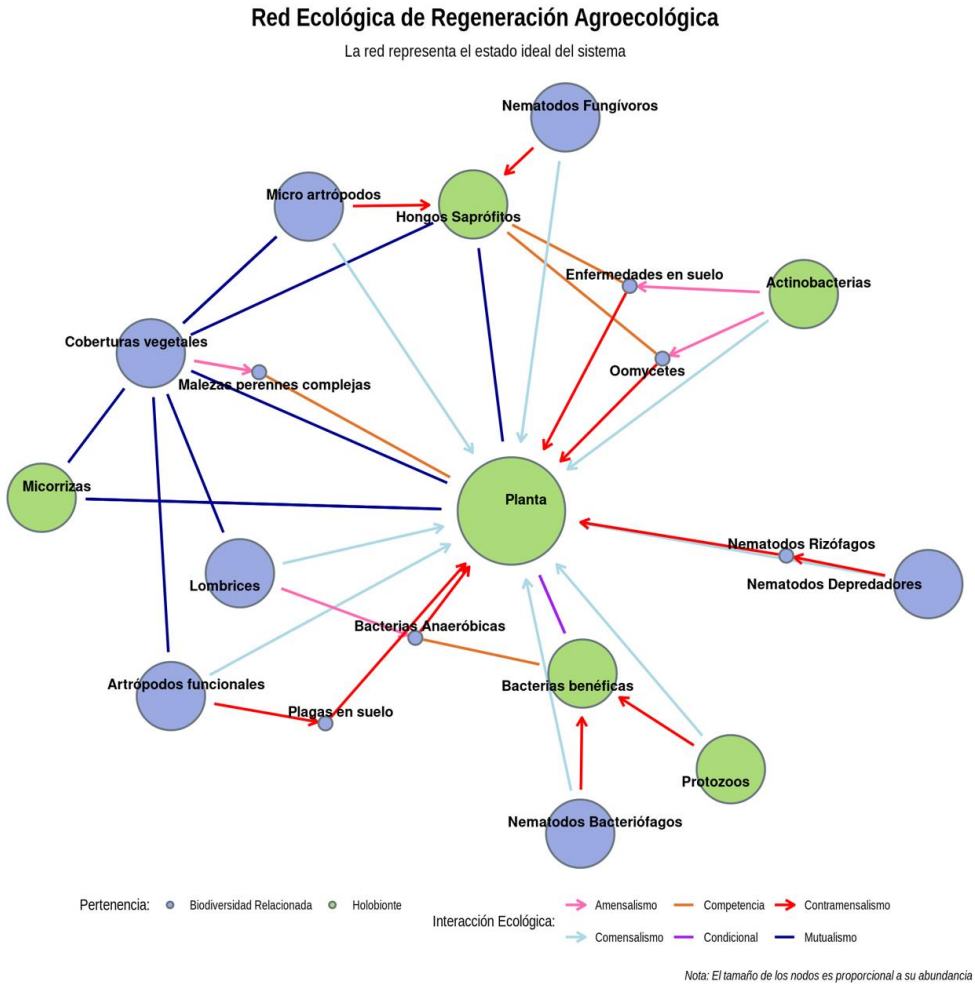


Figura 4. Representación idealizada de las interacciones ecológicas entre los distintos componentes del suelo de un agroecosistema bajo un manejo de regeneración agroecológica exitoso. Esta red constituye un EcoBauplan, es decir: un conjunto idealizado de atributos estructurales y funcionales conservados entre una clase de ecosistemas. El EcoBauplan está formado por (i) gremios funcionales recurrentes, (ii) tipos de interacciones ecológicas básicas y (iii) configuraciones particulares de la red. Estas características determinan la "arquitectura" básica del sistema ecológico, aunque siempre se manifiestan con variantes locales. Por esta razón, los nodos de la red no representan especies particulares, sino grupos de organismos. La red ha sido construida a partir de evidencia de campo y bibliográfica: Clarholm, 1985; Ingham *et al.,* 1985; Brussaard, 1998; Ingham 2000; Johansson et al., 2004; Simard, 2012; Simard *et al.,* 2012; Paungfoo-Lonhienne *et al.,* 2013; Hardoim *et al.,* 2015; Hartmann *et al.,* 2015; Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Müller *et al.,* 2016; Lecca *et al.,* 2016; Santoyo *et al.,* 2016; de Vries *et al.,* 2018; Mariotte et al, 2018; Khare et al, 2018; White *et al.,* 2018; 2019; Barra-Bucarei *et al.,* 2019; 2020; Griffon y Hernández, 2019; Meyer et al, 2020; Nannipieri et al; 2020; Trivedi *et al.,* 2020; Figueiredo *et al.,* 2021; Griffon *et al.,* 2021; Hou *et al.,* 2021; Mitter *et al.,* 2021; Verma *et al.,* 2021; Rolli *et al.,* 2021; Bettenfeld *et al.,* 2022; Zhang *et al.,* 2022; Allsup *et al.,* 2023; Chang *et al.,* 2023; Yang *et al.,* 2023; Merckx *et al.,* 2024; Rillig *et al.,* 2024; Tharanath *et al.,* 2024; Alayafi *et al.,* 2025; Arunrat *et al.,* 2025; Kuma *et al.,* 2024; Portal-González *et al.,* 2025.

Figure 4. Idealized representation of the ecological interactions among the different soil components of an agroecosystem under successful agroecological regeneration management. This network constitutes an EcoBauplan, that is, an idealized set of structural and functional attributes conserved across a class of ecosystems. The EcoBauplan is composed of (i) recurrent functional guilds, (ii) basic types of ecological interactions, and (iii) characteristic network configurations. Together, these features define the basic "architecture" of the ecological system, although they are always expressed with local variations. Consequently, the network nodes do not represent individual species but rather groups of organisms. The network was constructed based on field evidence and the following literature: Clarholm, 1985; Ingham et al., 1985; Brussaard, 1998; Ingham, 2000; Johansson *et al*., 2004; Simard, 2012; Simard *et al*., 2012; Paungfoo-Lonhienne *et al.*, 2013; Hardoim *et al*., 2015; Hartmann *et al*., 2015; Vandenkoornhuyse *et al*., 2015; Müller *et al*., 2016; Lecca *et al.,* 2016; Santoyo *et al.,* 2016; de Vries *et al*., 2018; Mariotte *et al.*, 2018; Khare *et al*., 2018; White *et al*., 2018; 2019; Barra-Bucarei *et al*., 2019; 2020; Griffon and Hernández, 2019; Meyer *et al*., 2020; Nannipieri *et al.,* 2020; Trivedi *et al*., 2020; Figueiredo *et al.,* 2021; Griffon *et al*., 2021; Hou *et al*., 2021; Mitter *et al.,* 2021; Verma *et al.,* 2021; Rolli *et al.,* 2021; Bettenfeld *et al.,* 2022; Zhang *et al.,* 2022; Allsup *et al.*, 2023; Chang *et al.,* 2023; Yang *et al*., 2023; Merckx *et al.,* 2024; Rillig *et al.,* 2024; Tharanath *et al.,* 2024; Kuma *et al.,* 2024; Alayafi *et al.,* 2025; Arunrat *et al.,* 2025; and Portal-González *et al.,* 2025.

Tabla 1. Descripción de los vínculos presentes en la red idealizada.

Table 1. Description of the interactions represented in the idealized network.

Origen	Destino	Tipo de Interacción	Rol en el Sistema
Planta	Bacterias benéficas	Condicional	Mutualismo mediado por el reclutamiento microbiano a través de exudados radicales (señales químicas y fuentes de carbono). La planta se beneficia al asociarse con bacterias capaces de fijar o solubilizar nutrientes, mientras que las bacterias obtienen acceso a fuentes de carbono y a un nicho ecológico favorable en la rizosfera. No obstante, bajo determinadas condiciones, esta interacción puede desplazarse hacia el contramensalismo* mediante procesos de rizofagia.
Planta	Micorrizas	Mutualismo	Intercambio bidireccional de nutrientes.
Planta	Hongos Saprófitos	Mutualismo	La planta provee carbono y hábitat a los hongos, mientras que los hongos saprófitos contribuyen a la mineralización de nutrientes y a la estructuración del suelo.
Coberturas vegetales	Planta	Mutualismo	Las coberturas retienen la humedad y mejoran la estructura del suelo, fijan nitrógeno (en el caso de las leguminosas) y generan hábitats favorables para organismos benéficos para las plantas. A su vez, el cultivo crea un microclima que favorece el desarrollo de las coberturas y contribuye al establecimiento de un microbioma propicio.
Coberturas vegetales	Micorrizas / Hongos saprófitos	Mutualismo	Las coberturas generan hábitat y sustrato para los hongos, mientras que estos contribuyen al suministro de nutrientes para las plantas.
Coberturas vegetales	Lombrices / Artrópodos	Mutualismo	Las coberturas brindan refugio a lombrices y artrópodos, los cuales, a su vez, mejoran la estructura del suelo, favoreciendo el desarrollo de sus raíces.
Lombrices / Artrópodos benéficos	Planta	Comensalismo	Mejoran la porosidad, la estructura y la aireación del suelo, favoreciendo el desarrollo de las raíces.
Protozoos	Planta	Comensalismo	Mineralización de nitrógeno que facilita su disponibilidad para las raíces.
Actinobacterias	Planta	Comensalismo	Estimulación del crecimiento vegetal mediante actividad promotora del crecimiento (PGPR)
Nematodos benéficos (varios)	Planta	Comensalismo	Incremento de la disponibilidad y movilidad de nutrientes en la rizósfera.
Hongos Saprófitos	Enfermedades del suelo	Competencia	Supresión de enfermedades del suelo a través de la ocupación competitiva del nicho.
Hongos Saprófitos	Oomycetes	Competencia	Exclusión competitiva de oomicetos por competencia por recursos limitados en el suelo.
Malezas perennes	Planta	Competencia	Interferencia con el cultivo principal por competencia por agua y nutrientes, así como por efectos alelopáticos.
Bacterias Anaeróbicas	Bacterias benéficas	Competencia	Desplazamiento de comunidades benéficas por condiciones de baja disponibilidad de oxígeno.
Actinobacterias	Enfermedades del suelo	Amensalismo	Producción de compuestos antibióticos con efecto inhibitorio sobre fitopatógenos.
Coberturas vegetales	Malezas perennes	Amensalismo	Supresión de malezas por competencia por luz y espacio.
Actinobacterias	Oomycetes	Amensalismo	Inhibición química de patógenos del suelo.
Lombrices	Bacterias Anaeróbicas	Amensalismo	Aireación del suelo.

Plagas / Enfermedades	Planta	Contramensalismo*	Daño directo al tejido vegetal.
Oomycetes / Rizófagos	Planta	Contramensalismo	Infección y deterioro de las raíces.
Nematodos Depredadores	Nematodos Rizófagos	Contramensalismo	Depredación.
Artrópodos Funcionales (depredadores)	Plagas en suelo	Contramensalismo	Depredación.
Nematodos (Fungívoros y Bacteriófagos)	Hongos / Bacterias	Contramensalismo	Consumo de microorganismos que favorece la aceleración del reciclaje de nutrientes.
Bacterias Anaeróbicas	Planta	Contramensalismo	Toxicidad asociada a compuestos reducidos (como H_2S) y utilización de compuestos orgánicos de origen vegetal.

Esta tabla se basa en la evidencia empleada para la elaboración de la Figura 4. La lista de ejemplos posibles es más amplia; aquí se presentan solo algunos casos representativos. * El término contramensalismo engloba las interacciones tróficas, en las cuales un organismo obtiene recursos alimenticios de otro, como ocurre en la depredación, el parasitismo y la herbivoría.

En conjunto, esta representación conceptual enfatiza que el éxito de la regeneración agroecológica no depende exclusivamente de la presencia de determinados organismos, sino de la arquitectura de la red de interacciones que estos establecen (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). La restauración del agroecosistema, entendida desde el marco del Holobionte, implica por lo tanto promover configuraciones de red que maximicen la conectividad funcional, la diversidad de interacciones y la resiliencia del sistema (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Griffon *et al.,* 2021; Portal-González *et al.,* 2025).

En la Figura 5 se presentan las redes ecológicas derivadas del Diagnóstico Holístico basado en el concepto de Holobionte para cada una de las unidades agrícolas evaluadas. En comparación con la red idealizada mostrada en la Figura 4, estas redes reales exhiben abundancias marcadamente diferentes.

La comparación de la red ecológica ideal con las redes observadas en condiciones reales constituye una herramienta analítica de alto valor para la toma de decisiones de manejo, ya que permite identificar con precisión los componentes, procesos e interacciones que se encuentran degradados en el sistema (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Griffon y Hernández, 2019; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). Desde esta perspectiva, el diagnóstico no se limita a una descripción estática del agroecosistema, sino que opera como un marco orientador que señala las trayectorias de restauración más plausibles, destacando los puntos de intervención con mayor potencial de impacto. Estas trayectorias son particulares para cada caso y se definen con base en los principios de la Regeneración Agroecológica antes presentados.

En definitiva, estos resultados demuestran que el Diagnóstico Holístico basado en el concepto de Holobionte constituye una innovación tecnológica robusta para evaluar el estado funcional de los agroecosistemas (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Griffon y Hernández, 2019; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). Al integrar información ecológica y estructural este enfoque permite trascender evaluaciones reduccionistas y capturar la complejidad inherente a los sistemas agrícolas. La capacidad de contrastar estados actuales con configuraciones ecológicas deseables no solo facilita la identificación de limitaciones críticas del sistema, sino que también proporciona una base conceptual y operativa para diseñar estrategias de manejo orientadas a la Regeneración Agroecológica (Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-Gonzalez *et al*., 2025). En este sentido, el Holobionte emerge como un concepto clave para comprender, gestionar y restaurar agroecosistemas, promoviendo trayectorias de manejo basadas en los principios de la Regeneración Agroecológica que refuercen la resiliencia y la sustentabilidad a largo plazo (Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-Gonzalez *et al.,* 2025). Es decir, la comparación entre estados actuales y estados deseables, junto a la interpretación y aplicación de los principios de la Regeneración Agroecológica, delinea un mapa ecológico que orienta las acciones de manejo hacia la reconstrucción de redes de interacción funcionales.

CONSIDERACIONES FINALES

La agricultura contemporánea enfrenta una crisis sin precedentes, amenazada por la urgencia climática y la viabilidad económica (Challinor *et al.,* 2014; Hendrickson *et al.,* 2017; Tigchelaar *et al.,* 2018; IPCC,

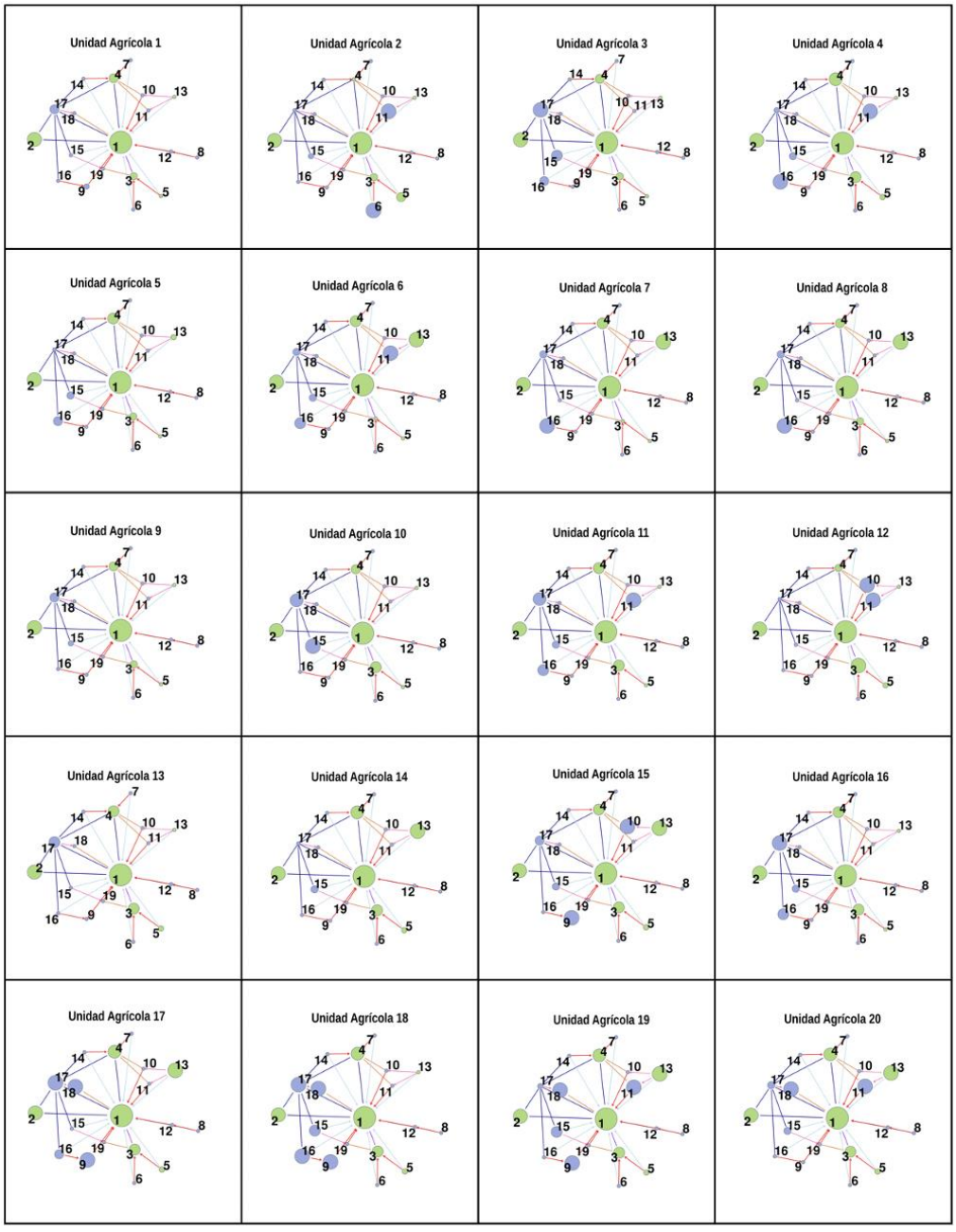


Figura 5. Redes de las unidades agrícolas evaluadas. Las equivalencias entre los números que identifican a los nodos y los grupos biológicos que estos representan son: 1 → Planta, 2 → Micorrizas, 3 → Bacterias benéficas, 4 → Hongos Saprófitos, 5 → Protozoos, 6 → Nematodos Bacteriófagos, 7 → Nematodos Fungívoros, 8 → Nematodos Depredadores, 9 → Plagas en suelo, 10 → Enfermedades en suelo, 11 → Oomycetes, 12 → Nematodos Rizófagos, 13 → Actinobacterias, 14 → Micro artrópodos, 15 → Lombrices, 16 → Artrópodos funcionales, 17 → Coberturas vegetales, 18 → Malezas perennes complejas, 19 → Bacterias Anaeróbicas. El tamaño de los nodos es proporcional a la abundancia del grupo que representan. Los nodos verdes corresponden a componentes del holobionte, mientras que los nodos morados representan elementos de la agrobiodiversidad asociada. Los colores de los vínculos indican los distintos tipos de interacción ecológica, de acuerdo con lo descrito en la Figura 4.

Figure 5. Networks of the agricultural units evaluated. The correspondence between the node identification numbers and the biological groups they represent is as follows: 1 → Plant, 2 → Mycorrhizae, 3 → Beneficial bacteria, 4 → Saprophytic fungi, 5 → Protozoa, 6 → Bacterivorous nematodes, 7 → Fungivorous nematodes, 8 → Predatory nematodes, 9 → Soil pests, 10 → Soil-borne diseases, 11 → Oomycetes, 12 → Root-feeding nematodes, 13 → Actinobacteria, 14 → Microarthropods, 15 → Earthworms, 16 → Functional arthropods, 17 → Cover vegetation, 18 → Complex perennial weeds, and 19 → Anaerobic bacteria. Node size is proportional to the abundance of the biological group represented. Green nodes correspond to components of the holobiont, whereas purple nodes represent elements of the associated agrobiodiversity. Link colors indicate the different types of ecological interactions, as described in Figure 4.

2022; Hultgren et al. 2025; Upham *et al.,* 2025). Frente a respuestas políticas insuficientes, la Regeneración Agroecológica se presenta como una disciplina emergente que integra el rigor científico de la agroecología con la practicidad de la agricultura regenerativa, situando al Holobionte, entendido como la planta y su microbioma, en el centro del manejo del agroecosistema (Vandenkoornhuyse *et al.,* 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025). En los casos presentados se aprecia que los sistemas convencionales sufren una profunda disrupción de sus redes ecológicas. En este contexto, el Diagnóstico Holístico basado en el Holobionte y los Principios de la Regeneración Agroecológica permiten restaurar estas relaciones biológicas y guiar la transición hacia un paradigma en el que la salud y la productividad emergen de la gestión integral del agroecosistema (Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025).

En definitiva, la Regeneración Agroecológica no es agricultura regenerativa, ni agroecología, es una disciplina emergente que combina enfoques de manera dinámica, integral e innovadora, buscando resolver problemas complejos con soluciones basadas en la naturaleza, que las ciencias y prácticas convencionales no enfrentan por sí solas, es una nueva forma de abordar los problemas productivos del agro desde una visión holística, anclada en el concepto del Holobionte (Vandenkoornhuyse *et al.*, 2015; Bettenfeld *et al.,* 2022; Portal-González *et al.,* 2025).

Aquí, el término disciplina se emplea en su sentido epistemológico. En este contexto una disciplina científica se caracteriza por poseer un objeto de estudio definido, un conjunto de problemas propios (Kuhn, 1962), un marco conceptual coherente y metodologías específicas que orientan de manera sistemática la producción de conocimiento y permiten el desarrollo de un programa de investigación acumulativo (Bunge, 1967, 1998). Asimismo, las disciplinas tienden a consolidarse alrededor de un dominio científico particular, entendido como un conjunto de problemas cuya explicación y resolución definen su identidad epistemológica (Kuhn, 1962/1970).

Desde esta perspectiva, la Regeneración Agroecológica trasciende una simple síntesis entre agroecología y agricultura regenerativa. Su objeto de estudio es la regeneración funcional de los agroecosistemas mediante el manejo del holobionte vegetal y de las redes ecológicas que sustentan su funcionamiento; su unidad central de análisis es el holobionte, en lugar de la planta o del suelo considerados de forma aislada; y su principal herramienta metodológica es el Diagnóstico Holístico basado en el Holobionte, concebido para identificar las causas funcionales de la degradación del sistema y orientar intervenciones regenerativas fundamentadas en la restauración de las interacciones ecológicas. Asimismo, propone un conjunto articulado de preguntas científicas acerca de la organización, diagnóstico, manejo y evolución del holobionte en los agroecosistemas, integrando conocimientos provenientes de la agroecología, la microbiología, la teoría de redes ecológicas, la biología evolutiva y la agricultura regenerativa bajo un marco conceptual unificado.

En este sentido, la Regeneración Agroecológica puede entenderse como una disciplina emergente, cuya identidad científica deriva de la coherencia entre su objeto de estudio, sus problemas de investigación y su metodología, más que de la existencia previa de estructuras institucionales consolidadas (Bunge, 1967, 1998). Vale la pena notar, que la conformación de comunidades científicas, revistas especializadas o sociedades académicas constituye habitualmente una consecuencia del proceso de consolidación disciplinaria y no un requisito para el surgimiento de una nueva disciplina (Kuhn, 1962; Toulmin, 1972).

Es importante señalar que la adopción a gran escala del cambio de paradigma propuesto por la Regeneración Agroecológica requiere un perfil profesional capaz de manejar la complejidad inherente a esta aproximación a la agricultura. Para esto resulta indispensable integrar el manejo agronómico regenerativo de cultivos con conocimientos avanzados en biología de poblaciones, a fin de comprender la dinámica ecológica y la coevolución del holobionte. Asimismo, es esencial un dominio profundo del manejo ecológico de plagas, enfermedades y arvenses basado en interacciones biológicas. El desarrollo de estas capacidades requiere el apoyo de herramientas propias de la ecología cuantitativa y el análisis de datos. A su vez, un conocimiento sólido de microbiología y ecología de microorganismos es clave para orientar la sucesión microbiana hacia estados funcionales deseados. Además, el modelado biomatemático de agroecosistemas se perfila como una competencia fundamental para el diseño de sistemas resilientes. En conjunto, estas capacidades interrelacionadas constituyen la base para el desarrollo de agroecosistemas robustos, que no solo resistan las perturbaciones climáticas, sino que regeneren la vida del suelo, permitan una producción agrícola rentable, escalable y de calidad.

Finalmente, la Regeneración Agroecológica nos recuerda que gran parte de lo que ocurre en un agroecosistema depende de procesos invisibles, pero fundamentales, en la intrincada red de interacciones que sostienen al Holobionte. Saint-Exupéry (1951) lo expresó con claridad: "*Lo esencial es invisible a los ojos*".

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Gabriela Rodríguez, Ignacio Castro, Carolina Roa e Iselen Trujillo por sus valiosas observaciones y comentarios sobre versiones preliminares del manuscrito. A Maximiliano Muñoz, Pilar

Browne y Lorena Barra por su inmenso apoyo, convicción y compañía en esta nueva visión. También a los árbitros, cuyas observaciones contribuyeron a precisar y fortalecer diversos aspectos del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

Abbas, A., Mubeen, M., Zheng, H., Sohail, M.A., Shakeel, Q., Solanki, M.K., Iftikhar, Y., Sharma, S., Kashyap, B.K., Hussain, S., Zuñiga, .M, Moya-Elizondo, E.A., Zhou, L. 2022. *Trichoderma* spp. genes involved in the biocontrol activity against *Rhizoctonia solani*. Front. Microbiol. 13:884469. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.884469

Abbott, A. D. 1988. The system of professions: An essay on the division of expert labor. University of Chicago Press.

Abbott, A. 2001. Chaos of Disciplines. University of Chicago Press.

Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Nuti, M. 2020. Ecosystem functions of microbial consortia in sustainable agriculture. Agronomy, 10(12), 1902. https://doi.org/10.3390/agronomy10121902

Alayafi, A.A.M., Alharbi, B.M., Abdulmajeed, A.M., Alnusaire, T.S., ALrashidi, A.A., AL-Balawi, S.M., Khalaf, H., Alghanem, S.M.S., Al zoubi, O.M., Soliman, M.H. 2025. Arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis enhances growth, nutrient uptake, and oil quality in sunflower–pumpkin under intercropping systems. Front. Plant Sci. 16:1598272. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1598272

Alfiky, A., Weisskopf, L., 2021. Deciphering Trichoderma–plant–pathogen interactions for better development of biocontrol applications. Journal of Fungi 7, 61. https://doi.org/10.3390/jof7010061

Allsup, C.M., George, I., Lankau, R.A., 2023. Shifting microbial communities can enhance tree tolerance to changing climates. Science 380, 835–840. https://doi.org/10.1126/science.adf2027

Alonso-Fradejas, A., Forero, L.F., Ortega-Espès, D., Drago, M., Chandrasekaran, K., 2020. Agroecología chatarra: La captura corporativa de la agroecología para una transición ecológica parcial y sin justicia social. Amigos de la Tierra Internacional, Transnational Institute, Crocevia.

Altieri, M.A., 2021. Confrontando la agroecología chatarra: Elementos para oponerse a la captura corporativa de la agroecología. Centro Latinoamericano de Investigaciones Agroecológicas (CELIA). https://celia.agroeco.org/wp-content/uploads/2021/04/co-optacion-agroeco.pdf

Altieri, M.A., Nicholls, C.I., 2021. Agroecología: Potenciando la agricultura campesina para revertir el hambre y la inseguridad alimentaria en el mundo. Revista de Economía Crítica 10, 62–74.

Altieri, M.A., Nicholls, C.I., 2000. Agroecología, teoría y práctica para una agricultura sustentable. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Arunrat, N., Mhuantong, W., Sereenonchai, S., 2025. Land-use legacies shape soil microbial communities and nutrient cycling functions in rotational shifting cultivation fields of Northern Thailand. Microbial Ecology 88, 102. https://doi.org/10.1007/s00248-025-02598-x

Baez, J.C., 2021. The fundamental theorem of natural selection. Entropy 23, 1436. https://doi.org/10.3390/e23111436

Barra-Bucarei, L., France, A. Millas, P. 2019. Crossing frontiers: endophytic entomopathogenic fungi for biological control of plant diseases. In: Hodkinson, T.R., Doohan, F.M., Saunders, M.J. Murphy, B.R. (Eds.), Endophytes for a Growing World. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 67–92. https://doi.org/10.1017/9781108607667.005

Barra-Bucarei, L., Gerding, M., France, A., Silva, A., Guerra, M., Vergara, P. 2020. *Beauveria bassiana* multifunction as an endophyte: Grow promotion and biologycal control of *Trialeurodes vaporarium*, (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) in tomato. Insects 11, 591. https://doi.org/10.3390/insects11090591

Behl, N., 2022. India's farmers' protest: An inclusive vision of Indian democracy. American Political Science Review 116, 1141–1146. https://doi.org/10.1017/S0003055422000156

Bender, S.F., Wagg, C., van der Heijden, M.G.A., 2016. An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in Ecology & Evolution 31, 440–452. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016

Berendsen, R.L., Pieterse, C.M., Bakker, P.A., 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. Trends in Plant Science 17, 478–486. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001

Bettenfeld, P., Cadena i Canals, J., Jacquens, L., Fernandez, O., Fontaine, F., van Schaik, E., Courty, P.-E., Trouvelot, S., 2022. The microbiota of the grapevine holobiont: A key component of plant health. Journal of Advanced Research 40, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.jare.2021.12.008

Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., Dutta, S., Roy Choudhury, M., Giri, A., Bera, B., Bag, K., Mukherjee, B., Banerjee, K., Gupta, D., Paul, D., 2025. Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production – A critical review of the impacts and adaptation strategies. Cambridge Prisms: Water 3, e4. https://doi.org/10.1017/wat.2024.16

Bloem, J., Starink, M., Bär-Gilissen, M.J.B., Cappenberg, T.E., 1988. Protozoan grazing, bacterial activity, and mineralization in two-stage continuous culture. Applied and Environmental Microbiology 54, 3113–3121. . https://doi.org/10.1128/aem.54.12.3113-3121.1988

Bloom, A.J., Sukrapanna, S.S., Warner, R.L., 1992. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. Plant Physiology 99, 1294–1301. https://doi.org/10.1104/pp.99.4.1294

Bonkowski, M., 2004. Protozoa and plant growth: The microbial loop in soil revisited. New Phytologist 162, 617–631. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01066.x

Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T., Malajczuk, N. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. ACIAR Monograph 32.

Brussaard, L., 1998. Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. Applied Soil Ecology 9(1–3), 123–135. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(98)00066-3

Bunge, M. 1967. Scientific Research I: The Search for System. Springer-Verlag.

Bunge, M. 1998. Philosophy of Science: From Explanation to Justification. Transaction Publishers.

Capra, F., 1998. La trama de la vida: Una nueva perspectiva de los sistemas vivos. Anagrama, Barcelona.

Capra, F., 2002. The hidden connections: A science for sustainable living. Doubleday, New York.

Capra, F., 2014. The systems view of life: A unifying vision. Cambridge University Press, Cambridge.

Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, C., Mahillon, J., 2019. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group. Frontiers in Microbiology 10, 302. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00302

Ceccarelli, S., 2009. Evolution, plant breeding and biodiversity. Journal of Agriculture and Environment for International Development 103, 131–145. https://doi.org/10.12895/jaeid.20091/2.28

Ceccarelli, S., Grando, S., 2020. Evolutionary plant breeding as a response to the complexity of climate change. iScience 23, 101815. https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101815

Chaboussou, F., 2005. Healthy crops: A new agricultural revolution. Gaia Foundation, Cornwall.

Challinor, A., Watson, J., Lobell, D., *et al.,* 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Climate Change 4, 287–291. https://doi.org/10.1038/nclimate2153

Chang, X., Young, B., Vaccaro, N., Strickland, R., Goldstein, W., Struwe, L., White, J.F., 2023. Endophyte symbiosis: Evolutionary development, and impacts of plant agriculture. Grass Research 3, 18. https://doi.org/10.48130/GR-2023-0018

Chepsergon, J., Moleleki, L.N., 2023. Rhizosphere bacterial interactions and impact on plant health. Current Opinion in Microbiology 73, 102297. https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102297

Chislett, W., 2024. Spanish farmers at the forefront of EU-wide protests. Real Instituto Elcano. https://www.realinstitutoelcano.org/en/commentaries/spanish-farmers-at-the-forefront-of-eu-wide-protests/. (acceso 22.01.2026)

Chouhan, G.K., Verma, J.P., Jaiswal, D.K., Mukherjee, A., Singh, S., Prudêncio de Araujo Pereira, A., Liu, H., Abd_Allah, E.F., Singh, B.K., 2021. Phytomicrobiome for promoting sustainable agriculture and food security: Opportunities, challenges, and solutions. Microbiological Research. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126763

Clarholm, M., 1985. Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. Soil Biology and Biochemistry 17, 181–187. https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90113-0

Clocchiatti, A., Hannula, S.E., van den Berg, M., Korthals, G., de Boer, W., 2020. The hidden potential of saprotrophic fungi in arable soil: Patterns of short-term stimulation by organic amendments. Applied Soil Ecology 145, 103434. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103434

Coleman, D.C., Crossley, D.A., Hendrix, P.F., 1994. Fundamentals of soil ecology. Academic Press, San Diego.

Compant, S., Clément, C., Sessitsch, A., 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. Soil Biology and Biochemistry 42, 669–678. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024

Congreves, K.A., 2025. Regenerative agriculture—a definition and philosophy. npj Sustainable Agriculture 3, 60. https://doi.org/10.1038/s44264-025-00097-7

Crowther, T.W., Boddy, L., Jones, T.H., 2012. Functional and ecological consequences of saprotrophic fungus–grazer interactions. The ISME Journal 6, 1992–2001. https://doi.org/10.1038/ismej.2012.53

Custódio, V., Salas-González, I., Gopaulchan, D., Oliveira, M.M., Salt, D.E., Castrillo, G., 2025. Individual leaf microbiota tunes a genetic regulatory network to promote leaf growth. Cell Host & Microbe 33, 436–450.e15. https://doi.org/10.1016/j.chom.2025.02.002

Dagunga, G., Ayamga, M., Laube, W., Ansah, I.G.K., Kornher, L., Kotu, B.H., 2023. Agroecology and resilience of smallholder food security: a systematic review. Frontiers in Sustainable Food Systems 7, 1267630. https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1267630

Dang Xuan, T., Xuan Chien, N., Dang Khanh, T., Duc Viet, T., Ngoc Minh, T.T. 2025. Advancements and challenges in allelopathy: a global perspective on agricultural practices. Journal of Crop Health 77, 151. https://doi.org/10.1007/s10343-025-01217-6

de Vries, F.T., Griffiths, R.I., Bailey, M.J., *et al.,* 2018. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. Nature Communications 9, 3033. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05516-7

DeLonge, M.S., Miles, A., Carlisle, L., 2016. Investing in the transition to sustainable agriculture. Environmental Science & Policy 55, 266–273. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.013

Edwards, A.W.F., 1994. The fundamental theorem of natural selection. Biological Reviews 69, 443–474. https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1994.tb01247.x

Elnahal, A.S.M., El-Saadony, M.T., Saad, A.M., *et al.,* 2022. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: a review. European Journal of Plant Pathology 162, 759–792. https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7

Erisman, J.W., 2021. Setting ambitious goals for agriculture to meet environmental targets. One Earth 4, 15–18. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.12.006

Esteves, E., Locatelli, G., Bou, N.A., Ferrarezi, R.S., 2021. Sap analysis: a powerful tool for monitoring plant nutrition. Horticulturae 7, 426. https://doi.org/10.3390/horticulturae7110426

European Commission, 2024a. Commission outlines immediate actions to address farmers' concerns. European Commission. Available at: https://agriculture.ec.europa.eu/news/commission-outlines-immediate-actions-address-farmers-concerns-2024-02-15_en (acceso 22.01.2026).

European Commission, 2024b. Temporary derogations from GAEC standards under the CAP. European Commission. Available at: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-derogations_en (acceso 22.01.2026).

FAO, 2018a. The 2nd International Symposium on Agroecology: Scaling up agroecology to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs). Summary of the Chair. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

FAO, 2018b. The 10 elements of agroecology. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: http://www.fao.org/3/i9037en/I9037EN.pdf (acceso 22.01.2026).

Figueiredo, A.F., Boy, J., Guggenberger, G., 2021. Common mycorrhizae network: a review of the theories and mechanisms behind underground interactions. Frontiers in Fungal Biology 2, 735299. https://doi.org/10.3389/ffunb.2021.735299

Fisher, R.A., 1999. The genetical theory of natural selection: a complete variorum edition. Oxford University Press, Oxford (original work published 1930).

Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K.V., Doelman, J., Gerber, J.S., Havlík, P., Hasegawa, T., Herrero, M., Krisztin, T., van Meijl, H., Powell, T., Sands, R.D., Stehfest, E., West, P.C., Smith, P., 2019. The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. Global Environmental Change 58, 101944. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944

Fox, J., Locatelli, G., Hussain, K., Hallman, L.M., Alcón-Bou, N., Estes, W.C., Ferrarezi, R.S., Rossi, L., 2025. Comparison of different plant sap, conventional leaf, and soil nutritional analyses in citrus groves under citrus greening conditions. HortTechnology 35, 810–820. https://doi.org/10.21273/HORTTECH05697-25

Fukuoka, M., 2013. La revolución de una brizna de paja: una introducción a la agricultura natural. EcoHabitar V.S., S.L., Artieda.

Garbisu, C., Unamunzaga, O., Alkorta, I., 2025. Generating regenerative agriculture: insights and challenges. Frontiers in Sustainable Food Systems 9, 1545811. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1545811

Ge, A.H., Li, Q.Y., Liu, H.W., Zhang, Z.K., Lu, Y., Liang, Z.H., Singh, B.K., Han, L.L., Xiang, J.F., Xiao, J.L., Liu, S.Y., Zhang, L.M., 2024. Streptomyces-triggered coordination between rhizosphere microbiomes and plant transcriptome enables watermelon Fusarium wilt resistance. Microbial Biotechnology 17, e14435. https://doi.org/10.1111/1751-7915.14435

Gilbert, S.F., Sapp, J., Tauber, A.I., 2012. A symbiotic view of life: we have never been individuals. Quarterly Review of Biology 87, 325–341. https://doi.org/10.1086/668166

Giraldo, O.F., Rosset, P.M., 2018. Agroecology as a territory in dispute: between isolation and co-optation. The Journal of Peasant Studies 45, 545–564. https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1366347

Gliessman, S., 1998. Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture. Sleeping Bear/Ann Arbor Press, Michigan, USA.

Gliessman, S.R., 2016. Transforming food systems with agroecology. Agroecology and Sustainable Food Systems 40, 187–189. https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1130765

González, J.E., Marketon, M.M., 2003. Quorum sensing in nitrogen-fixing rhizobia. Microbiology and Molecular Biology Reviews 67, 574–592. https://doi.org/10.1128/MMBR.67.4.574-592.2003

Gorzelak, M.A., Asay, A.K., Pickles, B.J., Simard, S.W., 2015. Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities. AoB Plants 7, plv050. https://doi.org/10.1093/aobpla/plv050

Griffon, D., Hernandez, M.J., 2019. Some theoretical notes on agrobiodiversity: spatial heterogeneity and population interactions. Agroecology and Sustainable Food Systems 43, 164–178. https://doi.org/10.1080/21683565.2019.1649781

Griffon, D., 2025. Los sabores de la agroecología. Acta Biologica Venezuelica 45, 313–328.

Griffon, D., Hernandez, M.J., 2014. Los ecosistemas no bailan sobre la punta de un alfiler: consecuencias del espacio en el manejo ecológico de plagas. Agroecología 9, 67–78.

Griffon, D., Hernandez, M.J., Ramírez, D., 2021. Theoretical clues for agroecological transitions: the Conuco legacy and the monoculture trap. Frontiers in Sustainable Food Systems 5, 529271. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.529271

Griffon, D., Rodríguez, E.G., 2017. En lo macro y en lo micro: sobre la importancia de las interacciones en la agroecología. Acta Biologica Venezuelica 37, 89–120.

Gupta, R., Anand, G., Gaur, R., Yadav, D., 2021. Plant-microbiome interactions for sustainable agriculture: a review. Physiologia Molecularis et Biologia Plantarum 27, 165–179. https://doi.org/10.1007/s12298-021-00927-1

Wang, H., Jiang, L., Weitz, J.S., 2009. Bacterivorous grazers facilitate organic matter decomposition: a stoichiometric modeling approach. FEMS Microbiology Ecology 69, 170–179. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00699.x

Hall, B.K., 1992. Evolutionary developmental biology. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7926-1

Hardoim, P.R., van Overbeek, L.S., van Elsas, J.D., 2008. Properties of bacterial endophytes and their proposed role in plant growth. Trends in Microbiology 16, 463–471. https://doi.org/10.1016/j.tim.2008.07.008

Hardoim, P., van Overbeek, L., Berg, G., 2015. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. Microbiology and Molecular Biology Reviews 79, 293–320. https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14

Harman, G.E., Howell, C.R., Viterbo, A., Chet, I., Lorito, M., 2004. *Trichoderma* species: opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology 2, 43–56. https://doi.org/10.1038/nrmicro797

Hartmann, A., Schikora, A., 2012. Quorum sensing of bacteria and trans-kingdom interactions of N-acyl homoserine lactones with eukaryotes. Journal of Chemical Ecology 38, 704–713. https://doi.org/10.1007/s10886-012-0141-7

Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. The ISME Journal 9, 1177–1194. https://doi.org/10.1038/ismej.2014.210

He, L., Rosa, L., 2023. Solutions to agricultural green water scarcity under climate change. PNAS Nexus 2, pgad117. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad117

Held, L., 2021. Is agroecology being co-opted by Big Ag? Civil Eats. https://civileats.com/2021/04/20/is-agroecology-being-co-opted-by-big-ag/ (acceso 22.01.2026)

Henao, A., Altieri, M.A., Nicholls, C.I., 2017. Herramienta didáctica para la planificación de fincas resilientes, 2nd ed. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroeco-

logía (SOCLA); Red Iberoamericana para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático (REDAGRES)

Hendrickson, M.K., Howard, P.H., Constance, D.H., 2017. Power, food and agriculture: implications for farmers, consumers and communities. Social Sciences 9, 190. https://doi.org/10.3390/socsci9110190

Hernandez, M.-J. 2021. The big ifs in the outcomes of species interactions: Review and insights from the Interaction Function (IF) model. Revista de Modelamiento Matemático de Sistemas Biológicos (MMSB), 1(1), 73–90.

Heuer. H., Reinecke, J., Schmalowski, D.,Abu, O.A. Hoernleinet, m., *et al*. 2026. Assembly of plant holobionts is governed by nematode communities and their associated microbiota, conditioned by preceding plants. bioRxiv [Preprint]. doi:10.64898/2026.07.02.736003.

Hou, L., Zhang, X., Feng, G., *et al.,* 2021. Arbuscular mycorrhizal enhancement of phosphorus uptake and yields of maize under high planting density in the black soil region of China. Scientific Reports 11, 1100. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80074-x

Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., Shao, G., 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. Journal of Forestry Research 32, 1–6. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1

Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M., *et al.,* 2025. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. Nature 642, 644–652. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w

Ingham, E., 2000. The soil food web. En: Tugel, A.J., Lewandowski, A.M., Happe-vonArb, D., eds. Soil Biology Primer. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.

Ingham, R.E., Trofymow, J.A., Ingham, E.R., Coleman, D.C., 1985. Interactions of bacteria, fungi, and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. Ecological Monographs 55, 119–140. https://doi.org/10.2307/1942528

IPCC, 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009325844

Jaćimović, V., 2023. The fundamental theorem of natural selection in optimization and games. Biosystems 230, 104956. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2023.104956

Jayasinghe, S.L., Thomas, D.T., Anderson, J.P., Chen, C., Macdonald, B.C.T., 2023. Global application of regenerative agriculture: a review of definitions and assessment approaches. Sustainability 15, 15941. https://doi.org/10.3390/su152215941

Jiménez-Ballesta, R., Mongil-Manso, J., Jiménez-Sánchez, A., 2025. Application of regenerative agriculture: a review and case study in an agrosilvopastoral region. Sustainability 17, 9066. https://doi.org/10.3390/su17209066

Johansson, J.F., Paul, L.R., Finlay, R.D., 2004. Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. FEMS Microbiol. Ecol. 48, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012

Kamath, A., Shukla, A., Patel, D., 2023. Quorum sensing and quorum quenching: two sides of the same coin. Physiological and Molecular Plant Pathology 123, 101927. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101927

Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., Bowyer, J., 2023. Regenerative agriculture — a literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. Sustainability 15, 2338. https://doi.org/10.3390/su15032338

Khare, E., Mishra, J., Arora, N.K., 2018. Multifaceted interactions between endophytes and plant: developments and prospects. Front. Microbiol. 9, 2732. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02732

Kırtel, O., Versluys, M., Van den Ende, W., Öner, E.T., 2019. Quorum sensing in phytopathogenesis. In: Kalia, V.C. (Ed.), Quorum sensing: molecular mechanism and biotechnological application, pp. 127–149. Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814905-8.00005-8

Kloepper, J.W., Ryu, C.-M., Zhang, S., 2004. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by Bacillus spp. Phytopathology 94, 1259–1266. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1259

Kostenko, O., van de Voorde, T.F.J., Mulder, P.P.J., van der Putten, W.H., Bezemer, T.M., 2012. Legacy effects of aboveground–belowground interactions. Ecol. Lett. 15(8), 813–821. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01801.x

Kumar, S., Tripathi, Y.N., Shukla, V., Singh, R.P., Kumar, A., Upadhyay, R.S., 2024. Endophytic fungi: diversity and their relevance in sustainable agriculture. In: Kumar, A., White, J.F., Singh, J. (Eds.), Plant and Soil Microbiome, pp. 375–399. Academic Press, Cambridge. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19150-3.00008-4

Kuhn, T. S. 1962. The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press.

LaCanne, C.E., Lundgren, J.G., 2018. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. PeerJ 6, e4428. https://doi.org/10.7717/peerj.4428

Lal, R., 2025. Soil organic matter: the heart of soil health. J. Soil Water Conserv. 80(4), 320–326. https://doi.org/10.1080/00224561.2025.2572280

Lavelle, P., Spain, A.V., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J.J., McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., Zangerlé, A., 2016. Soil ecology. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-5279-4

Lecca, P., Re, A., Ihekwaba, A., Mura, I., Nguyen, T.-P., 2016. Network-based conceptualization of observational data. In: Lecca, P. (Ed.), Computational Systems Biology: Inference and Modelling. Elsevier, pp. 47–65. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100095-3.00004-4

Leon, J.A., Charlesworth, B. 1978. Ecological Versions of Fisher's Fundamental Theorem of Natural Selection. Ecology, 59: 457-464. https://doi.org/10.2307/1936575

Li, C.H., Ma, B.L., Zhang, T.Q., 2002. Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (*Zea mays* L.) planted in large pots under field exposure. Can. J. Soil Sci. 82(2), 147–154. https://doi.org/10.4141/S01-026

Liu, X., Müller, C., Ort, D., Chai, T., 2022. Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. Earth's Future 10(5), e2021EF002567. https://doi.org/10.1029/2021EF002567

Loh, J., Pierson, E.A., Pierson, L.S. III, Stacey, G., Chatterjee, A., 2002. Quorum sensing in plant-associated bacteria. Curr. Opin. Plant Biol. 5(4), 285–290. https://doi.org/10.1016/S1369-5266(02)00274-1

Lou, Y., Davis, A.S., Yannarell, A.C., 2016. Interactions between allelochemicals and the microbial community affect weed suppression following cover crop residue incorporation into soil. Plant Soil 399, 357–371. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2698-8

Lu, Q., Miles, C., Tao, H., & DeVetter, L. 2022. Evaluation of real-time nutrient analysis of fertilized raspberry using petiole sap. Frontiers in Plant Science, 13, 918021. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918021

Maillard, F., Klinghammer, F., Jassey, V.E.J., Zhang, B., Kennedy, P.G., Lara, E., *et al.,* 2025. Hidden decomposers: Revisiting saprotrophy among soil protists and its potential impact on carbon cycling. Soil Biol. Biochem. 199, 109786. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109786

Margulis, L., 2002. Planeta simbiótico: Un nuevo punto de vista sobre la evolución. Victoria Laporta Gonzalo (trad.). Editorial Debate, Madrid.

Margulis, L., Sagan, D., 2003. Captando genomas: Una teoría sobre el origen de las especies. Ernst Mayr (prólogo). David Sempau (trad.). Editorial Kairós, Barcelona.

Mariotte, P., Mehrabi, Z., Bezemer, T.M., De Deyn, G.B., Kulmatiski, A., Drigo, B., Veen, G.F., van der Heijden, M.G.A., Kardol, P., 2018. Plant–soil feedback: Bridging natural and agricultural sciences. Trends Ecol. Evol. 33(2), 129–142. https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.005

Marschner, P. (Ed.), 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. Academic Press.

Martínez-Martínez, T.O., Guerrero-Aguilar, B.Z., Pecina-Quintero, V., Rivas-Valencia, P., González-Pérez, E., Angeles-Núñez, J.G., 2020. Antagonismo de *Trichoderma harzianum contra* la fusariosis del garbanzo y su efecto biofertilizante. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 11(5), 1135–1147. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i5.2325

Mauch-Mani, B., Baccelli, I., Luna, E., Flors, V., 2017. Defense priming: An adaptive part of induced resistance. Annu. Rev. Plant Biol. 68, 485–512. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-041132

Merckx, V.S.F.T., Gomes, S.I.F., Wang, D., *et al.,* 2024. Mycoheterotrophy in the wood-wide web. Nat. Plants 10, 710–718. https://doi.org/10.1038/s41477-024-01677-0

Mettepenningen, E., Verspecht, A., Van Huylenbroeck, G., 2008. Measuring private transaction costs of European agri-environmental schemes. J. Environ. Plann. Manag. 52(5), 649–667. https://doi.org/10.1080/09640560902958206

Meyer, J.M., Leempoel, K., Losapio, G., Hadly, E.A., 2020. Molecular ecological network analyses: an effective conservation tool for the assessment of biodiversity, trophic interactions, and community structure. Frontiers in Ecology and Evolution 8, 588430. https://doi.org/10.3389/fevo.2020.588430

Miao, Z., Zhao, Z., Long, T., Chen, X., 2023. Carbon footprint in agriculture sector: a literature review. Carbon Footprints 2, 13. http://dx.doi.org/10.20517/cf.2023.29

Mitter, E.K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K.E., Germida, J.J., 2021. Rethinking crop nutrition in times of modern microbiology: Innovative biofertilizer technologies. Front. Sustain. Food Syst. 5, 606815. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606815

Montgomery, D.R., Biklé, A., Archuleta, R., Brown, P., Jordan, J., 2022. Soil health and nutrient density: preliminary comparison of regenerative and conventional farms. PeerJ 10, e12848. https://doi.org/10.7717/peerj.12848

Moore, J.C., McCann, K., de Ruiter, P.C., 2005. Modeling trophic pathways, nutrient cycling, and dynamic stability in soils. Pedobiologia 49(6), 499–510. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.05.008

El Mujtar, V., Muñoz, N., Prack Mc Cormick, B., Pulleman, M., Tittonell, P., 2019. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand? Glob. Food Secur. 20, 132–144. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.007

Müller, D.B., Vogel, C., Bai, Y., Vorholt, J.A., 2016. The plant microbiota: Systems-level insights and perspectives. Annu. Rev. Genet. 50, 211–234. https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120215-034952

Murphy, K., Lammer, D., Lyon, S., Carter, B., Jones, S.S., 2004. Breeding for organic and low-input farming systems: An evolutionary–participatory breeding method for inbred cereal grains. Renew. Agric. Food Syst. 20(1), 48–55. https://doi.org/10.1079/RAF200355

Nannipieri, P., Ascher-Jenull, J., Ceccherini, M.T., Pietramellara, G., Renella, G., Schloter, M., 2020. Beyond microbial diversity for predicting soil functions: a mini review. Pedosphere 30, 5–17. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60824-6

Narayanan, S., 2021. Understanding farmer protests in India. Journal of Academics Stand Against Poverty 1(1), 133–140. https://doi.org/10.5281/zenodo.8091787

Narula, S., 2022. Confronting state violence: lessons from India's farmer protests. Columbia Human Rights Law Review 54(1), 1–84.

Nasim, I., Furrukh, B., 2025. Agricultural footprint dynamics: drivers and policy approaches to mitigate environmental impacts of agriculture. Journal of Environmental Economics and Ecology 6(1), 1–15. https://doi.org/10.52131/jee.2025.0601.0051

Newitt, J.T., Prudence, S.M.M., Hutchings, M.I., Worsley, S.F., 2019. Biocontrol of cereal crop diseases using Streptomycetes. Pathogens 8(2), 78. https://doi.org/10.3390/pathogens8020078

Newton, P., Civita, N., Martyn, L., Fowler, D., 2020. What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. Frontiers in Sustainable Food Systems 4, 577723. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723

Odum, E.P., 1969. The strategy of ecosystem development. Science 164(3877), 262–270. https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262

Odum, E. P., & Sarmiento, F. O. (1998). Ecología: El puente entre ciencia y sociedad. McGraw-Hill Interamericana.

Pan, P., Yuan, X., Jiang, Y., Wang, Y., Wang, X., Cao, Y., 2025. Three-dimensional ecological footprint assessment of cropland in typical grain-producing regions based on carbon footprint improvement. Land 14, 852. https://doi.org/10.3390/land14040852

Paungfoo-Lonhienne, C., Rentsch, D., Robatzek, S., Webb, R.I., Sagulenko, E., Nasholm, T., *et al.,* 2013. Rhizophagy — a

new dimension of plant-microbe interactions. In: Advances in Plant-Microbe Interactions, pp. 115–138. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch115
Phillips, J. M., Hayman, D. S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 55(1), 158-161.
Phillips, S.L., Wolfe, M.M., 2005. Evolutionary plant breeding for low input systems. Journal of Agricultural Science 143, 245–254. https://doi.org/10.1017/S0021859605005009
Pieterse, C.M.J., Zamioudis, C., Berendsen, R.L., Weller, D.M., Van Wees, S.C.M., Bakker, P.A.H.M., 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. Annual Review of Phytopathology 52, 347–375. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340
Pino, C., Griffon, D. 2024. Scaling up: microbiome manipulation for climate change adaptation in large organic vineyards. Frontiers in Sustainable Food Systems. 8:1285981. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1285981
Pocock, M.J.O., Evans, D.M., Memmott, J., 2012. The robustness and restoration of a network of ecological interactions. Science 335(6071), 973–977. https://doi.org/10.1126/science.1214915
Portal-Gonzalez, N., Wang, W., He, W., Santos-Bermudez, R. 2025. Engineering plant holobionts for climate-resilient agriculture. *The ISME Journal*, 19(1), wraf158. https://doi.org/10.1093/ismejo/wraf158
Price, G. R. 1972. Fisher's "fundamental theorem" made clear. *Annals of Human Genetics*, 36(2), 129–140. https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1972.tb00764.x
Primavesi, A. (1982). Manejo ecológico del suelo: la agricultura en regiones tropicales. El Ateneo, Buenos Aires.
Raggi, L., Ciancaleoni, S., Torricelli, R., Terzi, V., Ceccarelli, S., Negri, V. 2017. Evolutionary breeding for sustainable agriculture: Selection and multi-environmental evaluation of barley populations and lines. *Field Crops Research*, 204, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.011
Recepoğlu, M., Hayaloğlu, P., Cakir, S. C., Artan, S., Cakir, M. A. 2025. Ecological footprint components and agricultural productivity: Insights from MENA countries. Science of the Total Environment, 992, 179852. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179852
Rhodes, C. J. 2017. The imperative for regenerative agriculture. Science Progress, 100(1), 80–129. https://doi.org/10.3184/003685017X14876756692096
Rietra, R. P. J. J., Heinen, M., Dimkpa, C. O., Bindraban, P. S. 2017. Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 48(16), 1895–1920. https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429
Rillig, M. C., Lehmann, A., Lanfranco, L., Caruso, T., Johnson, D. 2024. Clarifying the definition of common mycorrhizal networks. Functional Ecology, 39(6), 1411–1417. https://doi.org/10.1111/1365-2435.14545
Rodríguez, I. C., Flores, J. 2020. Antagonistic capacity of Trichoderma spp. in vitro against *Rhizoctonia solani* Kuhn and *Fusarium verticillioides* Nirenberg. Bioagro, 30(1), 49–58. https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/2710
Rolli, E., Vergani, L., Ghitti, E., Patania, G., Mapelli, F., Borin, S. 2021. 'Cry-for-help' in contaminated soil: a dialogue among plants and soil microbiome to survive in hostile conditions. Environmental Microbiology, 23;23(10):5690–5703. https://doi.org/10.1111/1462-2920.15647
Roop, R., Weaver, M., Fonseca, A. P., Matouq, M. 2023. Agroecology as catalyst for smallholder farming mitigation and adaptation to climate change: Caribbean region. In W. L. Filho (Ed.), SDGs in the Americas and Caribbean Region (pp. 405–427). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16017-2_112
Rosa, L., Chiarelli, D.D., Rulli, M.C., Dell'Angelo, J., D'Odorico, P. 2020. Global agricultural economic water scarcity. Science Advances, 6(18), eaaz6031. https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz6031
Rosado-May, F.J. 2019. Agroecología intercultural, una opción ante el riesgo de cooptación. Paper presented at the 1st Mexican Congress of Agroecology, San Cristóbal de las Casas, Chiapas, Mexico.
Rosset, P.M., Altieri, M.A. 2017. Agroecology: Science and Politics. Fernwood Publishing, Barcelona.
Roughgarden, J. 2020. Holobiont Evolution: Mathematical Model with Vertical vs. Horizontal Microbiome Transmission. Philosophy, Theory, and Practice in Biology, 12(2). https://doi.org/10.3998/ptpbio.16039257.0012.002
Roughgarden, J. 2023. Holobiont Evolution: Population Theory for the Hologenome. The American Naturalist 201(6). https://doi.org/10.1086/723782
Saint-Exupéry, A. de. 1951. El principito. Emecé Editores
Saikkonen, K., Nissinen, R., Helander, M. 2020. Toward comprehensive plant microbiome research. Frontiers in Ecology and Evolution, 8, 61. https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00061
Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E. 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. Agronomy Journal, 101(4), 800–816. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0162rx
Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., Orozco-Mosqueda, M.d.C., Glick, B.R. 2016. Plant growth-promoting bacterial endophytes. Microbiological Research, 183, 92–99. https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008
Sarrocco, S., Esteban, P., Vicente, I., Bernardi, R., Plainchamp, T., Domenichini, S., Puntoni, G., Baroncelli, R., Vannacci, G., Dufresne, M. 2021. Straw Competition and Wheat Root Endophytism of *Trichoderma gamsii* T6085 as Useful Traits in the Biological Control of Fusarium Head Blight. Phytopathology, 111(7), 1129–1136. https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-20-0441-R
Schneider, T. 2021. Interactions within the Holobiont: On the Holobiont's Interactions of Its Microorganisms. Philosophy, Theory, and Practice in Biology, 13(5). doi:10.3998/ptpbio.16039257.0013.005
Scott, T.W., Kiers, E.T., West, S.A. 2025. The evolution of signaling and monitoring in plant–fungal networks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 122(4), e2420701122. https://doi.org/10.1073/pnas.2420701122
Segarra, J., Buchaillot, M.L., Araus, J.L., Kefauver, S.C. 2020. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 im-

proved features and applications. Agronomy, 10(5), 641. https://doi.org/10.3390/agronomy10050641

Sharma, S., Gupta, N., Kaur, S., Kumawat, K.C., Chakkal, A.S. 2025. Soil microbial resources: Unlocking sustainable strategies for crop productivity and soil health. Curr. Res. Microb. Sci., 9, 100468. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100468

Simard, S.W., Beiler, K.J., Bingham, M.A., Deslippe, J.R., Philip, L.J., Teste, F. P. 2012. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. Fungal Biol. Rev., 26, 39–60. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2012.01.001

Simard, S. W. 2012. Mycorrhizal networks and seedling establishment in Douglas-fir forests. In D. Southworth (Ed.), Biocomplexity of Plant–Fungal Interactions (pp. 85–107). John Wiley & Sons, Inc.

Smith, S. E., Read, D. J. 2008. Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.). Academic Press.

Singh, S. 2023. The farmers' movement against three agricultural laws in India: A study of organisation. RAS J., 12(1), 1–18. https://doi.org/10.25003/RAS.12.01.0012

Sinha, T., Nandi, K., Das, R., Prasad, S.N., Pradhan, M., Maurya, S., Nandi, A. 2022. Microbe-mediated biotic and abiotic stress tolerance in crop plants. In Malik, J. A. (Ed.), Microbes and microbial biotechnology for green remediation (pp. 93–116). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00015-3

SOCLA 2024. X Congreso Latinoamericano de Agroecología: Ejes Temáticos. Asunción, Paraguay. https://clae2024.una.py/ejes-tematicos (acceso 22.01.2026)

Sterner, R. W., Elser, J. J. 2002. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton University Press.

Stokstad, E. 2019. Nitrogen crisis hits Dutch infrastructure. Science, 366(6470), 1180–1181. https://doi.org/10.1126/science.366.6470.1180

Stummer, B.E., Moghaddam, M.J., Roohani-Dezfouli, M., Nidumolu, B., Zhang, X., Harvey, P.R. 2025. Wheat rhizosphere persistence of *Trichoderma gamsii* A5MH during suppression of a Fusarium–Pythium root disease complex differentially impacts the soil fungal and oomycete microbiome. Journal of Applied Microbiology, 136(7), lxaf158. https://doi.org/10.1093/jambio/lxaf158

Suman, J., Rakshit, A., Ogoti, S.D., Singh, A., Gupta, C., Bhardwaj, A.K. 2022. Microbiome as a key player in sustainable agriculture and human health. Frontiers in Soil Science, 2, 821589. https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.821589

Tharanath, A.C., Upendra, R.S., Rajendra, K. 2024. Soil symphony: A comprehensive overview of plant–microbe interactions in agricultural systems. Applied Microbiology, 4(4), 1549–1567. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4040106

Theis, K.R., Dheilly, N.M., Klassen, J.L., Brucker, R.M., Baines, J.F., Bosch, T.C.G., Cryan, J.F., Gilbert, S.F., Goodnight, C.J., Lloyd, E.A., Sapp, J., Vandenkoornhuyse, P., Zilber-Rosenberg, I., Rosenberg, E., Bordenstein, S.R. 2016. Getting the hologenome concept right: An eco-evolutionary framework for hosts and their microbiomes. mSystems, 1, e00028-16. https://doi.org/10.1128/mSystems.00028-16

Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Naylor, R., Ray, D.K. 2018. Future warming increases probability of globally synchronized maize production losses. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(26), 6644–6649. https://doi.org/10.1073/pnas.1718031115

Trivedi, P., Leach, J.E., Tringe, S.G., Sa, T., Singh, B. K. (2020). Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. Nature Reviews Microbiology, 18(11), 607–621. https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1

Toulmin, S. 1972. Human Understanding: The Collective Use and Evolution of Concepts. Princeton University Press.

Upham, P., Scholte, R., Feron, S. (2025). Social representations of injustice in sustainability transitions: The case of farmers and Dutch agricultural nitrogen policy. Frontiers in Political Science, 7, 1501904. https://doi.org/10.3389/fpos.2025.1501904

Valdés, E. M. 2019. Bifurcaciones en la senda de la agroecología: Cooptación institucional versus soberanía alimentaria. biodiversidadla. Available at: https://www.biodiversidadla.org/Documentos/Bifurcaciones-en-la-senda-de-la-Agroecologia-Cooptacion-institucional-versus-soberania-alimentaria (acceso 22.01.2026)

Valverde, S., Vidiella, B., Montañez, R., et al. 2020. Coexistence of nestedness and modularity in host–pathogen infection networks. Nature Ecology & Evolution, 4, 568–577. https://doi.org/10.1038/s41559-020-1130-9

Van der Ploeg, J. D. 2020. Farmers' upheaval, climate crisis and populism. The Journal of Peasant Studies, 47(3), 589–605. https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1725490

Vandenkoornhuyse, P., Quaiser, A., Duhamel, M., Le Van, A., Dufresne, A. 2015. The importance of the microbiome of the plant holobiont. New Phytologist, 206(4), 1196–1206. https://doi.org/10.1111/nph.13312

Vandermeer, J., Goldberg, D.E., 2003. Population ecology: first principles. Princeton University Press.

Vandermeer, J., Perfecto, I. 2018. Ecological complexity and agroecology. Routledge, London.

Vassileva, M., Flor-Peregrin, E., Malusá, E., Vassilev, N. 2020. Towards better understanding of the interactions and efficient application of plant beneficial prebiotics, probiotics, postbiotics and synbiotics. Frontiers in Plant Science, 11, 1068. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01068

Vázquez, L. L., Matienzo, Y., Griffon, D. 2014. Diagnóstico participativo de la biodiversidad en fincas en transición agroecológica. Fitosanidad, 18(3), 151–162.

Venturi, V., Keel, C. 2016. Signaling in the phytosphere. Trends in Plant Science, 21(1), 187–198. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.013

Verma, S.K., Sahu, P.K., Kumar, K., Pal, G., Gond, S.K., Kharwar, R.N., White, J.F. 2021. Endophyte roles in nutrient acquisition, root system architecture development and oxidative stress tolerance. Journal of Applied Microbiology, 131(5), 2161–2177. https://doi.org/10.1111/jam.15111

Vizuete, B., Oteros-Rozas, E., García-Llorente, M. 2024. Role of the neo-rural phenomenon and the new peasantry in agroecological transitions: A literature review. Agriculture and Human Values, 41, 1277–1297. https://doi.org/10.1007/s10460-023-10537-0

Weckwerth, W., Chaturvedi, P., Ghatak, A., Kerou, M., Garg, V., Bohra, A., Subbarao, G.V., Stein, L., Schleper, C., Varsh-

ney, R.K., Snapp, S. 2025. Natural variation of the holobiont for sustainable agroecosystems. Trends in Plant Science. 30(9):972-979. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.05.006

Wezel, A., Herren, B.G., Kerr, R.B., Barrios, E., Rodrigues-Gonçalves, A.L. 2020. Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. Agronomy for Sustainable Development, 40, 40. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C. 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice: A review. Agronomy for Sustainable Development, 29(4), 503–515. https://doi.org/10.1051/agro/2009004

White, J.F., Kingsley, K.L., Verma, S.K., Kowalski, K.P. 2018. Rhizophagy cycle: An oxidative process in plants for nutrient extraction from symbiotic microbes. Microorganisms, 6(3), 95. https://doi.org/10.3390/microorganisms6030095

White, J.F., Torres, M.S., Verma, S.K., Elmore, M.T., Kowalski, K.P., Kingsley, K.L. 2019. Evidence for widespread microbivory of endophytic bacteria in roots of vascular plants through oxidative degradation in root cell periplasmic spaces. In Singh, AK., Kumar, A and Singh, P.K (Eds.), Microbial endophytes (pp. 161–178). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815879-1.00009-4

Wienhold, K., Goulao, L.F. 2023. The embedded agroecology of coffee agroforestry: A contextualized review of smallholder farmers' adoption and resistance. Sustainability, 15(8), 6827. https://doi.org/10.3390/su15086827

Willmore, K.E., 2012. The body plan concept and its centrality in evo-devo. Evolution: Education and Outreach 5(2), 219–230. https://doi.org/10.1007/s12052-012-0424-z

Yang, C.-X., Chen, S.-J., Hong, X.-Y., Wang, L.-Z., Wu, H.-M., Tang, Y.-Y., Gao, Y.-Y., Hao, G.-F. 2025. Plant exudates-driven microbiome recruitment and assembly facilitates plant health management. FEMS Microbiology Reviews, 49, fuaf008. https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf008

Yang, X., Hu, H.-W., Yang, G.-W., Cui, Z.-L., Chen, Y.-L. 2023. Crop rotational diversity enhances soil microbiome network complexity and multifunctionality. Geoderma, 436, 116562. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116562

Yuan, J., Zhang, H., Wen, T., Thomashow, L.S., Penton, C.R., Zhao, M., Shen, Q. 2020. Predicting disease occurrence with high accuracy based on soil macroecological patterns of Fusarium wilt. The ISME Journal, 14(12), 2936–2950. https://doi.org/10.1038/s41396-020-0720-5

Zayed, O., Hewedy, O.A., Abdelmoteleb, A., Ali, M., Youssef, M.S., Roumia, A.F., Seymour, D. Yuan, Z.C. 2023. Nitrogen journey in plants: from uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. Biomolecules, 13(10), 1443. https://doi.org/10.3390/biom13101443

Zhang, Q., Kingsley, K.L. White, J.F. 2022. Endophytic Pseudomonas sp. from Agave palmeri participate in the rhizophagy cycle and act as biostimulants in crop plants. Biology, 11(12), 1790. https://doi.org/10.3390/biology11121790

ANEXO 1: MATERIALES Y MÉTODOS DEL ESTUDIO DE CASO

Selección de las unidades agrícolas

Para la selección de las 20 unidades agrícolas participantes, se establecieron criterios de inclusión basados en cuatro ejes principales:

1. Distribución territorial y diversidad productiva: La selección de los productores se orientó a representar el desarrollo de la actividad frutícola y vitícola en las cuatro provincias de la Región del Maule, Chile (Talca, Curicó, Linares y Cauquenes). El protocolo de muestreo garantizó la inclusión de los principales sistemas productivos de la región, incorporando frutales caducos mayores (manzano, cerezo, nogal, peral y kiwi), frutales de hoja persistente (palto y olivo), frutales menores (frutilla, arándano y frambueso) y viñas para vinificación y usos especiales.

2. Atributos edáficos homogéneos: Los predios seleccionados se localizaron sobre suelos del valle central y de zonas de lomaje suave de la precordillera y del secano interior, con texturas que variaron entre franca y franco-arcillosa/arcillosa. Para reducir la variabilidad asociada a las condiciones edáficas de origen, se estableció como criterio de inclusión un contenido de materia orgánica (MO) ≥ 1,9%; los predios seleccionados presentaron un valor promedio de 3% y un máximo de 6%. Estos criterios permitieron mantener condiciones edáficas iniciales comparables y minimizar el efecto de la heterogeneidad basal del suelo.

3. Afinidad y experiencia en manejo regenerativo: Se priorizó la incorporación de productores con interés demostrado en la adopción o fortalecimiento de prácticas de manejo regenerativo, independientemente de su nivel previo de experiencia. Este criterio tuvo como objetivo conformar una muestra de unidades productivas con una disposición favorable hacia la implementación de estrategias de regeneración agroecológica, garantizando el compromiso con las actividades de diagnóstico, monitoreo y seguimiento desarrolladas durante el estudio.

4. Compromiso de implementación de prácticas mínimas: Como criterio de inclusión, cada productor asumió el compromiso de implementar, durante el ciclo de estudio, al menos una práctica de manejo regenerativo, seleccionada entre las siguientes: aplicación de bioinsumos (microorganismos eficientes y compost líquido), incorporación de enmiendas orgánicas (compost, vermicompost o biocompost) y establecimiento de cultivos de cobertura (leguminosas o gramíneas). La implementación de estas prácticas estuvo orientada a promover procesos de regeneración del suelo, incluyendo la disminución de la compactación, el aumento del contenido de materia orgánica y el fortalecimiento de la actividad biológica edáfica.

Métodos analíticos

Se realizaron cuatro tipos de evaluaciones en cada unidad agrícola durante el mismo periodo fenológico (primavera-verano 2025), siguiendo los protocolos estandarizados que se describen a continuación.

Análisis físico-químico de suelo

En cada predio se recolectó una muestra compuesta de suelo del horizonte superficial (0–20 cm de profundidad). Se determinaron los siguientes parámetros: pH, mediante potenciometría en una suspensión suelo:agua (1:2,5); conductividad eléctrica (CE), en extracto suelo:agua (1:5); materia orgánica (MO), mediante el método de Walkley-Black; fósforo disponible, mediante el método de Olsen; potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na) intercambiables, mediante extracción con acetato de amonio 1 N (pH 7,0) y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica; y textura, mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos. Los resultados analíticos se interpretaron utilizando los rangos de referencia del laboratorio AGROLAB (José Domingo Cañas 2914, Ñuñoa, Santiago, Chile), complementados con criterios técnicos consensuados por un panel de especialistas (investigadores, consultores y gerentes agrícola) con experiencia en los sistemas productivos evaluados.

Análisis de biomasa microbiana del suelo

La caracterización de la comunidad microbiana del suelo se realizó siguiendo la metodología de la *Soil Food Web* descrita por Ingham (1985, 2000), con adaptaciones para sistemas frutícolas y vitícolas perennes de la Región del Maule. En cada predio se recolectaron muestras de suelo rizosférico (0–15 cm de profundidad), las cuales se mantuvieron en condiciones de refrigeración y se procesaron en fresco para preservar la integridad de los organismos.

La evaluación microbiológica incluyó la cuantificación de los principales grupos funcionales del suelo mediante microscopía óptica y microscopía de contraste de fases. Se estimó la biomasa bacteriana, fúngica y de actinobacterias a partir del recuento de células bacterianas, hifas fúngicas y actinobacterias, expresándose los resultados como µg de biomasa microbiana g^{-1} de suelo seco. Asimismo, se cuantificaron las poblaciones de protozoos (flagelados, amebas desnudas y amebas testáceas) y nematodos benéficos (bacteriófagos, fun-

gívoros y depredadores) mediante la técnica del Número Más Probable (*Most Probable Number*, MPN), expresándose los resultados como número de individuos g^{-1} de suelo seco. Adicionalmente, se registró la presencia o ausencia de microorganismos indicadores de anaerobiosis, ciliados, organismos potencialmente patógenos (por ejemplo, oomicetos y nematodos fitófagos), así como la diversidad de microorganismos y microartrópodos observados durante el análisis microscópico.

Adicionalmente, se determinó el estado de la simbiosis micorrícica mediante el análisis de raíces finas. Las muestras fueron aclaradas, teñidas con azul de tripano y evaluadas siguiendo la metodología propuesta por Phillips y Hayman (1970). En especies asociadas a micorrizas arbusculares se cuantificó el porcentaje de colonización intrarradical, el porcentaje de arbúsculos como estructuras de intercambio de nutrientes y el porcentaje de vesículas como estructuras de reserva. En especies ectomicorrícicas, como el avellano europeo (*Corylus avellana*), se estimó el porcentaje de raíces finas con manto fúngico visible.

La interpretación de los indicadores microbiológicos y micorrícicos se realizó con base en los criterios establecidos en la literatura especializada (Brundrett et al., 1996; Smith & Read, 2008), complementados con la revisión técnica de la especialista Patricia Silva (Universidad Católica del Maule, Talca, Chile), considerando las características de los sistemas productivos evaluados.

Análisis foliar

El estado fisiológico de las plantas se evaluó mediante análisis foliares. Para ello, se recolectaron hojas jóvenes completamente expandidas durante el período matutino (08:00–10:00 h), con el propósito de reducir la variabilidad derivada del estado hídrico y de las oscilaciones fisiológicas a lo largo del día. En campo se determinaron los grados Brix mediante refractometría portátil, el pH y la conductividad eléctrica (CE) mediante medidor multiparámetro. Los resultados se interpretaron empleando los rangos de referencia desarrollados por el Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad de Talca para frutales caducos y perennes.

Análisis de savia

(este análisis no realizó en el estudio de caso presentado, pero forma parte del Diagnostico Holístico, por esta razón se incluye). El análisis de savia vegetal se utiliza como herramienta de diagnóstico para evaluar la fracción soluble de nutrientes y el estado metabólico inmediato de la planta. El muestreo se realiza en plantas representativas del lote, seleccionando hojas jóvenes completamente expandidas y fisiológicamente activas, preferentemente durante las primeras horas de la mañana (06:00–09:00 h), con el objetivo de reducir la variabilidad asociada a las fluctuaciones diurnas del estado hídrico y del metabolismo vegetal.

Las muestras se mantienen refrigeradas durante el transporte y se procesan idealmente dentro de las 24 horas posteriores a la recolección. La savia se obtiene mediante extracción por presión mecánica o centrifugación del tejido fresco. En el extracto obtenido se determinan parámetros como pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos solubles (°Brix), además de concentraciones de nutrientes minerales, incluyendo nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S) y micronutrientes esenciales. Las determinaciones analíticas se realizan mediante cromatografía iónica, espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) o espectrofotometría, según corresponda. Los resultados se interpretan utilizando rangos de referencia específicos para cada cultivo y estado fenológico.

Análisis ecológico macro

El análisis ecológico macro integró criterios derivados del enfoque de la *Soil Food Web* (Ingham, 2000) y principios agroecológicos orientados a la evaluación funcional de los agroecosistemas (Griffon, 2025). La evaluación se realizó directamente en terreno mediante observaciones estandarizadas del suelo, la vegetación y la biodiversidad asociada, considerando indicadores estructurales, funcionales y biológicos del sistema productivo.

Los indicadores evaluados fueron los siguientes:

Biodiversidad funcional: Se registró la presencia y abundancia relativa de artrópodos epigeos mediante observación directa de la superficie del suelo y recorridos de campo. La presencia de lombrices se evaluó mediante conteo directo en calicatas de 100 × 100 × 50 cm. Adicionalmente, se registró la presencia de vertebrados asociados al funcionamiento ecológico del sistema, incluyendo aves y mamíferos considerados potencialmente benéficos por su función como reguladores biológicos o componentes de la red trófica.

Cobertura y composición de la vegetación: Se determinó el porcentaje de cobertura vegetal del suelo, la riqueza de especies presentes en la cubierta y la presencia de grupos funcionales relevantes, particularmente leguminosas y especies arbustivas o matorrales asociados a procesos sucesionales y recuperación ecológica.

Calidad funcional de la materia orgánica: Se realizó una evaluación cualitativa de la actividad biológica asociada a la materia orgánica mediante el Test de Efervescencia

(reacción con peróxido de hidrógeno como indicador indirecto de actividad microbiana), complementada con la evaluación de atributos organolépticos del suelo, tales como color, estructura y olor característico de suelo forestal. Estos indicadores cualitativos se integraron con los valores cuantitativos de contenido de materia orgánica obtenidos mediante análisis físico-químico.

Estructura del suelo y compactación: La estructura edáfica se evaluó mediante observación directa en calicatas, considerando características como agregación, estabilidad estructural y presencia de macroporosidad. La resistencia mecánica del suelo se estimó mediante el uso de martillo geológico como indicador cualitativo de compactación y de limitaciones físicas para el desarrollo radicular.

Presencia de plagas, enfermedades y malezas perennes: Se realizaron evaluaciones visuales mediante recorridos sistemáticos en zig-zag dentro del predio y observaciones complementarias en calicatas, registrando la presencia de organismos fitófagos, síntomas asociados a enfermedades y especies vegetales problemáticas.

Conversión a escala ordinal y criterios de calificación

Con el objetivo de integrar indicadores provenientes de distintas dimensiones del funcionamiento del agroecosistema y facilitar la interpretación de los resultados por parte de los usuarios finales, los indicadores cuantitativos y cualitativos derivados de los cuatro componentes del Diagnóstico Holístico fueron transformados a una escala ordinal de 1 a 7. En esta escala, el valor 1 representa la condición más desfavorable del indicador (asociada a una baja funcionalidad o degradación del atributo evaluado), mientras que el valor 7 corresponde a la condición más favorable (asociada a una alta funcionalidad ecológica y productiva). La utilización de una escala de siete niveles se debe a su familiaridad para los productores y técnicos agrícolas en Chile, al coincidir con el sistema de calificación educativa nacional, facilitando la comunicación y comprensión de los resultados.

Los criterios de conversión fueron definidos mediante un proceso de triangulación basado en tres fuentes complementarias:

1- Literatura científica y referencias técnicas especializadas: Se utilizaron rangos reportados en la literatura científica para indicadores microbiológicos asociados al enfoque *Soil Food Web*, estándares técnicos de laboratorios especializados para variables físico-químicas del suelo y análisis nutricionales vegetales, así como criterios agroecológicos para indicadores relacionados con biodiversidad, cobertura vegetal y funcionamiento ecológico del agroecosistema.

2- Información empírica de campo: Los rangos teóricos fueron contrastados y ajustados utilizando información recopilada durante el primer año del proyecto *Tecnologías para Suelos Vivos*, cofinanciado por la Corporación de Fomento de la Producción de Chile (CORFO). Esta base de datos permitió adaptar los umbrales de interpretación a las condiciones edafoclimáticas, productivas y de manejo características de los sistemas frutícolas y vitícolas de la Región del Maule.

3- Validación mediante panel de expertos: Los criterios de clasificación fueron revisados y ajustados mediante un proceso de evaluación experta que incluyó investigadores, consultores privados y gerentes agrícolas con experiencia en sistemas frutícolas y vitícolas de la zona centro-sur de Chile. Este proceso permitió validar la pertinencia agronómica y ecológica de los rangos establecidos.

Procedimiento de calificación según tipo de análisis:

Análisis físico-químico del suelo y análisis foliar o de savia: Para cada variable analizada (por ejemplo, pH, materia orgánica, fósforo, potasio o concentración de nutrientes foliares), el valor obtenido fue transformado a una escala ordinal de 1 a 7 según el rango de referencia correspondiente al cultivo, condición edáfica y estado fenológico evaluado. Por ejemplo, valores bajos de materia orgánica (<2,0 %) fueron asociados a categorías inferiores, mientras que valores elevados (>5,0 %) correspondieron a categorías superiores. La puntuación global de cada componente se obtuvo mediante el promedio de sus indicadores individuales. Para variables consideradas estructurales en el funcionamiento del suelo, particularmente materia orgánica, pH y conductividad eléctrica, se aplicó una ponderación diferencial debido a su influencia transversal sobre la disponibilidad de nutrientes, actividad biológica y calidad edáfica.

Análisis de biomasa microbiana: La evaluación microbiológica se integró mediante un sistema de ponderación basado en la relevancia funcional de cada grupo biológico dentro de la red trófica del suelo, de acuerdo con la literatura especializada asociada al enfoque *Soil Food Web*. La biomasa bacteriana y fúngica representó el 25 % del índice microbiológico cada una, mientras que protozoos y nematodos benéficos representaron el 20 % cada grupo. Los indicadores asociados a microorganismos relacionados con condiciones anaeróbicas y diversidad microbiana representaron el 5 % cada uno. Cada indicador microbiológico individual (por ejem-

plo, biomasa fúngica, relación hongo:bacteria o abundancia de nematodos funcionales) fue transformado a una escala ordinal de 1 a 7 mediante la comparación del valor observado con rangos esperados para sistemas productivos y estados sucesionales definidos en la literatura especializada. La evaluación de micorrizas arbusculares y ectomicorrizas se realizó de manera independiente, considerando indicadores específicos como porcentaje de colonización radicular, abundancia de arbúsculos y presencia de vesículas, utilizando como referencia los criterios propuestos por Smith y Read (2008) y ajustes derivados del conocimiento experto.

Análisis ecológico macro: Los indicadores ecológicos macro (biodiversidad funcional, cobertura vegetal, calidad de materia orgánica, estructura del suelo y presencia de plagas, enfermedades y malezas perennes) fueron transformados a una escala ordinal de 1 a 7 mediante criterios de evaluación ecológica y agronómica definidos por expertos. Por ejemplo, para biodiversidad funcional, valores inferiores correspondieron a sistemas dominados por especies oportunistas o baja representación de grupos funcionales claves, mientras que valores superiores correspondieron a sistemas con mayor diversidad funcional y presencia de organismos asociados a procesos ecológicos favorables. La integración del componente ecológico macro se realizó mediante un promedio ponderado de sus indicadores, asignando mayor relevancia relativa a variables consideradas determinantes para la salud del agroecosistema, particularmente presencia de lombrices, estado de las coberturas vegetales e incidencia de organismos considerados negativos.