ISSN Versión Impresa 1816-0719 ISSN Versión en línea 1994-9073 ISSN Versión CD ROM 1994-

The Biologist (Lima), 2026, vol. 24 (1), 69-79

The Biologist (Lima)



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

ORGANIC AGRICULTURE AND SUSTAINABILITY: ANALYSIS OF AGRONOMIC PRACTICES AND NUTRIENT AVAILABILITY AT CLARK FARM, MASSACHUSETTS, USA

AGRICULTURA ORGÁNICA Y SOSTENIBILIDAD: ANÁLISIS DE PRÁCTICAS AGRONÓMICAS Y DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES EN CLARK FARM, MASSACHUSETTS, ESTADOS UNIDOS

Emerson Jaime-Huamán[1*]

[1] Universidad Científica del Sur. Departamento de Ciencias de la Salud y de la Vida. Escuela de Ingeniería Ambiental. Panamericana Sur km 19. Lima 42, Perú.

* Corresponding author: escalaverde2021@gmail.com

Emerson Jaime-Huaman: https://orcid.org/0000- 0002- 3832 -5391

ABSTRACT

This study evaluated crop diversity, agronomic practices, and soil chemical properties at Clark Farm organic farm, Massachusetts, USA, to analyze their contribution to a sustainable agricultural system. Seven agronomic management components and various soil fertility parameters, including pH, cation exchange capacity, macronutrients, and micronutrients, were analyzed. The results showed that crop diversification and organic practices promote productive stability, biological pest control, and agroecosystem sustainability. However, elevated levels of phosphorus and calcium and marginal micronutrient availability were identified, suggesting the need for balanced nutritional management.

Keywords: agroecosystem — organic agriculture — soil management — sustainable production

RESUMEN

Este estudio evaluó la diversidad de cultivos, las prácticas agronómicas y las propiedades químicas del suelo en la granja orgánica Clark Farm, Massachusetts, Estados Unidos, con el objetivo de analizar su contribución a un sistema agrícola sostenible. Se analizaron siete componentes de manejo agronómico y diversos parámetros de fertilidad del suelo, incluyendo pH, capacidad de intercambio catiónico, macronutrientes y micronutrientes. Los resultados evidenciaron que la diversificación de cultivos y las prácticas orgánicas favorecen la estabilidad productiva, el control biológico de plagas y la sostenibilidad del agroecosistema. Sin embargo, se identificaron niveles elevados de fósforo y calcio y una disponibilidad marginal de micronutrientes, lo que sugiere la necesidad de un manejo nutricional equilibrado.

Palabras clave: agricultura orgánica — agroecosistema — manejo de suelo — producción sostenible

Este artículo es publicado por la revista The Biologist (Lima) de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

DOI: https://doi.org/10.62430/rtb20262412076

INTRODUCCIÓN

La Agricultura Orgánica (AO) es un sistema integral de manejo de la producción que considera los ciclos biológicos naturales y la actividad biológica del suelo, reduciendo el uso de insumos externos, priorizando prácticas naturales y evitando el empleo de fertilizantes y pesticidas sintéticos. Su objetivo principal es optimizar la salud y productividad de las comunidades interdependientes que conforman el sistema agrícola, promoviendo un equilibrio sostenible para las generaciones presentes y futuras (Cidón *et al*., 2021; Rempelos *et al*., 2021; Rahman *et al*., 2021). Asimismo, diversos estudios destacan que la agricultura orgánica contribuye a mejorar la salud del suelo, la biodiversidad y la sostenibilidad de los agroecosistemas mediante prácticas enfocadas en el reciclaje de nutrientes y el fortalecimiento de la actividad biológica del suelo (del Pino, 2002; Scialabba & Hattam, 2002; Alföldi *et al.,* 2002; Montgomery & Biklé, 2021).

Desde hace 10 mil años, cuando inició la transición de sociedades, desde la revolución neolítica hasta la revolución industrial de la segunda mitad del siglo XX, se ha practicado la AO (Salinas, 2014). Cuando surgió la producción agrícola industrializada, los insumos orgánicos han sido paso a paso reemplazados por insumos químicos (fertilizantes, insecticidas y plaguicidas), y semillas criollas por semillas híbridas y semillas transgénicas (Molina, 2021).

A pesar de que la AO fue relegada, a la fecha 188 países en el mundo practican, en una extensión promedio de 98,9 millones de ha, por al menos 4,3 millones de agricultores, y las ventas globales de alimentos y bebidas orgánicas superaron los 136 millones de euros en 2023 (Willer *et al*., 2025). En Estados Unidos, según la encuesta del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, entre 2019 y 2021, el número de granjas orgánicas certificadas con producción orgánica aumentó en un 5%, alcanzando 17.445 granjas, con una extensión total de 1,98 millones de ha (USDA, 2020).

A pesar de que el porcentaje de AO va aumentando, las limitaciones como la falta de investigación, acceso a la ciencia y tecnología por los pequeños y medianos agricultores, mercado y conciencia social han sido las principales debilidades (Lamichhane *et al*., 2022; Ochieng *et al.,* 2022; Ayaz *et al.,* 2023). Los análisis de las propiedades del suelo en un laboratorio son fundamentales (Krauss *et al*., 2020). Según Valenzuela & Visconti (2018) y Batis *et al.* (2020), las propiedades químicas del suelo, como pH, CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico) y saturación de bases intercambiables, son las ideales para interpretar las condiciones del suelo como medio químico. Conociendo las condiciones físicas del suelo se puede controlar el desarrollo y rendimiento de los cultivos; ya que se pueden interpretar los procesos químicos y microbiológicos de la planta, y conocer mejor las actividades agrícolas a desarrollar (Escobar-Perea, 2021).

El objetivo del presente trabajo de investigación es analizar las propiedades químicas del suelo, la saturación de bases intercambiables, así como la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes, con el fin de clasificar las parcelas según su estado de equilibrio (equilibrado, moderadamente equilibrado o desequilibrado). Asimismo, se determina el Índice de Fertilidad del Suelo Orgánico (IFSO) como una herramienta integral para evaluar la capacidad real del suelo de una granja orgánica ubicada en el estado de Massachusetts, Estados Unidos.

MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se llevó a cabo en la granja orgánica Clark Farm, ubicada en Carlisle, condado de Middlesex, estado de Massachusetts, en las coordenadas geográficas 42,524427° N y 71,353628° W, a una altitud promedio de 60 msnm. Esta granja cuenta con certificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y del Real Organic Project (https://realorganicproject.org/), organismos que promueven la idea de que la salud humana y la salud ambiental están intrínsecamente ligadas. En sus más de 32 acres de extensión, la granja produce alimentos orgánicos mediante prácticas de cultivo sostenibles que favorecen la salud del suelo, del medio ambiente y de la comunidad.

Esta granja cuenta con varias parcelas, en las que se implementan prácticas agroecológicas; de ellas, cuatro parcelas principales fueron seleccionadas para el presente trabajo de investigación (Figura 1). Se inició con un análisis exploratorio de los datos de las parcelas, incluyendo la variedad de cultivos sembrados en la temporada anterior, manejo del suelo, fertilización orgánica, control de plagas y enfermedades, control de malezas (hierbas), semillas y material vegetal, manejo del agua, biodiversidad y equilibrio ecológico, manejo postcosecha y bienestar animal; posteriormente, se realizaron los muestreos de suelo y el análisis de sus propiedades químicas en laboratorio.



Figura 1. Mapa de ubicación de la granja orgánica Clark Farm, pueblo de Carlisle, Condado de Middlesex, estado de Massachusetts, Estados Unidos.

Muestreo de suelo

Se utilizó un muestreo compuesto de suelo por parcela al inicio de la temporada 2025, antes de la instalación de cultivos. En cada una de las cuatro parcelas (acre cada una), se recolectaron submuestras de suelo en puntos seleccionados de manera aleatoria. Las submuestras fueron homogeneizadas para obtener una muestra compuesta representativa por parcela. No se consideró una profundidad específica de muestreo, siguiendo el protocolo de muestreo compuesto (MCSE, 2023).

Análisis de laboratorio

Los análisis de suelo fueron realizados por el Soil and Plant Nutrient Testing Laboratory de la Universidad de Massachusetts Amherst (UMass Amherst), Estados Unidos, utilizando el método de relación suelo:solución (1:1) para el pH y el método Modified Morgan Extractable para los micronutrientes y macronutrientes del suelo.

Los valores de pH, capacidad de intercambio catiónico, acidez intercambiable, macronutrientes y micronutrientes fueron interpretados utilizando rangos de referencia establecidos para suelos agrícolas de clima templado húmedo de Nueva Inglaterra, debido a que las condiciones edafoclimáticas regionales influyen en la disponibilidad y dinámica de nutrientes del suelo. Los criterios de interpretación fueron tomados de las guías del Soil and Plant Nutrient Testing Laboratory de la University of Massachusetts Amherst (2025).

Aspectos éticos: El estudio se desarrolló siguiendo principios éticos de investigación científica, asegurando la correcta recolección, análisis e interpretación de los datos, así como el respeto por el medio ambiente y las actividades productivas de la granja evaluada.

RESULTADOS

En la granja orgánica Clark Farm se cultivan más de cincuenta variedades agrícolas por temporada, hierbas aromáticas y flores. El análisis de la diversidad de cultivos muestra un predominio de especies pertenecientes a las familias Solanaceae (27,45 %), Brassicaceae (25,49 %), Asteraceae (11,76 %) y Apiaceae (7,84 %), las cuales representan la mayor proporción del total de cultivos registrados (Tabla 1).

Tabla 1. Variedades de cultivos de la granja orgánica Clark Farm, Massachusetts, Estados Unidos.

N°	Variedades	Nombre científico	Familia
1	Lechuga dragón	*Lactuca sativa*	Asteraceae
2	Zanahoria roja	*Daucus carota*	Apiaceae
3	Zanahoria naranja	*Daucus carota*	Apiaceae
4	Lechuga romana verde	*Lactuca sativa*	Asteraceae
5	Lechuga romana morada	*Lactuca sativa*	Asteraceae
6	Betarraga morada	*Beta vulgaris*	Amaranthaceae
7	Betarraga amarilla	*Beta vulgaris*	Amaranthaceae
8	Pak choi Repollo	*Brassica rapa chinensis*	Brassicaceae
9	Coliflor	*Brassica oleracea var. Botrytis*	Brassicaceae
10	Brócoli	*Brassica oleracea var. Italica*	Brassicaceae
11	Espinaca	*Spinacia oleracea*	Amaranthaceae
12	Albahaca	*Ocimum basilicum*	Lamiaceae
13	Diente de león	*Taraxacum officinale*	Asteraceae
14	Culantro	*Coriandrum sativum*	Apiaceae
15	Col o repollo caraflex	*Brassica oleracea var. Botrytis*	Brassicaceae
16	Col o repollo redondo	*Brassica oleracea var. Capitata*	Brassicaceae
17	Kale crespo verde	*Brassica oleracea var. Sabellica*	Brassicaceae
18	Kale italiana o clásica	*Brassica oleracea var. Sabellica*	Brassicaceae
19	Kale crespo morada	*Brassica oleracea var. Sabellica*	Brassicaceae
20	Calabaza zucchini	*Cucurbita pepo*	Cucurbitaceae
21	Calabacín amarillo	*Cucurbita pepo*	Cucurbitaceae
22	Berengena	*Solanum melongena*	Solanaceae
23	Pimiento amarillo	*Capsicum annuum*	Solanaceae
24	Pimiento anaranjado	*Capsicum annuum*	Solanaceae
25	Pimiento rojo	*Capsicum annuum*	Solanaceae
26	Aji poblano	*Capsicum annuum*	Solanaceae
27	Aji jalapeño	*Capsicum annuum*	Solanaceae
28	Ají cayena	*Capsicum annuum*	Solanaceae
29	Aji cuerno de toro	*Capsicum annuum*	Solanaceae
30	Aji chichito	*Capsicum annuum*	Solanaceae

(Continúa Tabla 1)

(Continúa Tabla 1)

N°	Variedades	Nombre científico	Familia
31	Girasoles	*Helianthus annuus*	Asteraceae
32	Brocolini	*Brassica oleracea var. Italica*	Brassicaceae
33	Tomate cherry	*Solanum lycopersicum*	Solanaceae
34	Tomate red beef	*Solanum lycopersicum*	Solanaceae
35	Tomate gigante Moon	*Solanum lycopersicum*	Solanaceae
36	Tomate gigante Harvest	*Solanum lycopersicum*	Solanaceae
37	Rabanito	*Raphanus sativus*	Brassicaceae
38	Vainitas o frejoles verdes	*Phaseolus vulgaris*	Fabaceae
39	Arveja	*Pisum sativum*	Fabaceae
40	Ajos	*Allium sativum*	Alliaceae
41	Cebolla	*Allium cepa*	Alliaceae
42	Lechuga mesclun	*Lactuca sativa*	Asteraceae
43	Fresa	*Fragaria vesca*	Rosaceae
44	Aguaymanto	*Physalis peruviana*	Solanaceae
45	Arándano	*Vaccinium myrtillus*	Ericaceae
46	Orégano	*Origanum vulgare*	Lamiaceae
47	Hinojo	*Foeniculum vulgare*	Apiaceae
48	Perejil	*Petroselinum crispum*	Apiaceae
49	Repollo chino napa	*Brassica rapa*	Brassicaceae
50	Rábano de pulpa roja	*Raphanus sativus*	Brassicaceae
51	Rábano daikon morado	*Raphanus sativus*	Brassicaceae

Las principales prácticas agronómicas aplicadas durante las diferentes fases del sistema productivo de la granja Clark Farm se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Las prácticas agronómicas aplicadas.

N°	Componentes	Prácticas agronómicas
1	Manejo del suelo	• Rotación de cultivos. • Uso de abonos orgánicos (compost, estiércol, humus de lombriz). • Incorporación de materia orgánica. • Labranza controlada. • Uso de cultivos de cobertura (gramíneas).
2	Fertilización orgánica	• Compost y compostaje en la granja. • Uso de minerales naturales permitidos (roca fosfórica, cal agrícola).

(Continúa Tabla 2)

(Continúa Tabla 2)

3	Control de plagas y enfermedades	• Control biológico (uso de insectos benéficos). • Manejo integrado de plagas (MIP). • Diversificación de cultivos para romper ciclos de plagas. • Triturado de plantas enfermas para romper ciclos de plagas. • Planificación del calendario de siembra. • Eliminación de residuos o plantas enfermas que puedan albergar vectores de enfermedad. • Fomentar insectos benéficos.
4	Control de malezas (hierbas)	• Control manual o mecánico. • Aplicación de mulch (paja y rastrojos). • Rotación de cultivos. • Uso de tela y/o geotextil.
5	Semillas y material vegetal	• Planificación y compra de semillas orgánicas certificadas. • Conservación de semillas nativas. • Propagación vegetativa de plantas.
6	Manejo del agua	• Riego eficiente por goteo y aspersor programado. • Conservación de fuentes de agua. • Nivelación de parcelas para evitar escorrentía. • Planificación de riego con climograma, para aprovechar aguas de lluvia.
7	Biodiversidad y equilibrio ecológico	• Parcelación de cultivos para parecerse a policultivos y asociaciones de cultivos. • Cercos vivos. • Conservación de áreas naturales. • Producción de flores que atraigan abejas, mariposas (refugio de fauna benéfica). • Inclusión de polinizadores.
8	Manejo postcosecha	• Limpieza sin químicos sintéticos. • Almacenamiento natural (control de humedad y temperatura). • Uso de métodos físicos para conservación. • Etiquetado y documentación de cada lote desde la cosecha hasta su venta.
9	Bienestar animal	• Alimentación orgánica. • Manejo sanitario preventivo. • Acceso al aire libre y pastoreo según necesidades de la especie. • Limpieza y desinfección regulares de instalaciones, comederos y bebederos. • Control de acceso (limitación de visitas externas, desinfección de ropa/herramientas antes de entrar). • Separación de animales según edad y estado de salud. • Ventilación adecuada, control de temperatura y humedad para reducir estrés y enfermedades respiratorias. • Eliminación rápida de cadáveres y animales enfermos para cortar ciclos de infección.

Los valores de pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), acidez intercambiable, así como las concentraciones de macro y micronutrientes, se encuentran en su mayoría dentro de los rangos óptimos establecidos para suelos de clima templado húmedo de Nueva Inglaterra (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de laboratorio del análisis de pH, capacidad de intercambio catiónico, acidez intercambiable, macronutrientes y micronutrientes.

Parámetros	Parcela 1 P1	Parcela 2 P2	Parcela 3 P3	Parcela 4 P4	Rango óptimo
pH del suelo (1:1, H_2O)	6,50	6,50	6,60	6.60	7
Fósforo (P) mg/kg o ppm	14,80	34,50	24,30	19.60	4-14
Potasio (K) mg/kg o ppm	68,00	190,00	176,00	108.00	100-160
Cálcio (Ca) mg/kg o ppm	1213,00	2218,00	1781,00	1865,00	1000-1500
Magnesio (Mg) mg/kg o ppm	70,00	201,00	115,00	108,00	50-120
Azufre (S) mg/kg o ppm	12,30	1,.50	14,60	13,60	>10
Boro (B) mg/kg o ppm	0,20	0,40	0,30	0,20	0,1-0,5
Manganeso (Mn) mg/kg o ppm	2,40	2,20	2,30	2,60	1,1-6,3
Zinc (Zn) mg/kg o ppm	1,50	2,30	1,30	1,20	1,0-7,6
Cobre (Cu) mg/kg o ppm	0,10	0,10	0,10	0,10	0,3-0,6
Hierro (Fe) mg/kg o ppm	2,70	2,30	2,60	2,30	2,7-9,4
Capacidad de intercambio catiónico (CIC) cmol/kg o meq/100 g	9,30	16,10	12,30	12,30	30-50
Acidez intercambiable cmol/kg o meq/100 g	2,50	2,90	2,00	1,90	2-4

El pH del suelo en las cuatro parcelas evaluadas presenta un rango estrecho, con valores comprendidos entre 6,5 y 6,6. Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) oscila entre 9,3 y 16,1 cmol/kg, mientras que la acidez intercambiable varía entre 1,9 y 2,9 cmol/kg, ubicándose estos parámetros cercanos al límite inferior del rango óptimo establecido (Figura 2).

En cuanto a los macronutrientes, el fósforo presenta valores que oscilan entre 14,8 y 34,5 mg/kg, ubicándose por encima del rango óptimo. El potasio muestra concentraciones entre 68 y 190 mg/kg, con la parcela P1 por debajo del rango óptimo, las parcelas P2 y P3 por encima, y la parcela P4 dentro del rango recomendado. El magnesio varía entre 68 y 201 mg/kg, registrándose en la parcela P2 valores superiores al rango óptimo. El azufre presenta concentraciones entre 12,3 y 17,5 mg/kg, las cuales se mantienen dentro del rango óptimo. Finalmente, el calcio oscila entre 1 213 y 2 218 mg/kg, observándose valores superiores al rango óptimo en las parcelas P2, P3 y P4 (Tabla 1).

En relación con los micronutrientes, el boro presenta valores entre 0,2 y 0,4 mg/kg, ubicándose dentro del rango óptimo. El manganeso registra concentraciones entre 2,3 y 2,6 mg/kg, igualmente dentro del rango recomendado. El zinc varía entre 1,2 y 2,3 mg/kg, manteniéndose también en niveles óptimos. En contraste, el cobre presenta un valor constante de 0,1 mg/kg en las cuatro parcelas evaluadas, situándose por debajo del rango óptimo. Finalmente, el hierro oscila entre 2,3 y 2,7 mg/kg, valores que se encuentran por debajo del límite inferior del rango óptimo establecido (Tabla 1).

DISCUSIÓN

El análisis de las variedades de cultivo producidas en la granja orgánica Clark Farm evidenció la relevancia de la diversificación agrícola como estrategia clave dentro de sistemas productivos sostenibles. La diversificación de variedades no solo amplía la base productiva de los cultivos, sino que también contribuye a diversificar las dietas, incrementar la disponibilidad de nutrientes y fortalecer la seguridad alimentaria. Asimismo, puede mejorar la estabilidad productiva y las condiciones ambientales del agroecosistema (Luna-González & Sørensen, 2018; FAO, 2018; Puneeth *et al.,* 2024). Por otro lado, la diversificación varietal favorece una mayor abundancia y diversidad de enemigos naturales, lo que contribuye al control biológico de plagas dentro de los agroecosistemas. Este equilibrio ecológico permite mantener las poblaciones de plagas en niveles bajos sin depender de insumos externos, reforzando así los principios de la agricultura orgánica (Lenné & Wood, 2024).

Las prácticas agronómicas aplicadas en el sistema productivo de la granja orgánica Clak Farm, estructuradas en siete componentes, constituyen un modelo de producción saludable tanto para la salud humana como para el medio ambiente. En este contexto, la agricultura orgánica es considerada más respetuosa con el entorno que la agricultura convencional y capaz de contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible mediante el uso de tecnologías verdes, generando beneficios económicos, sociales y ecológicos (Cidón *et al.*, 2021). Asimismo, este enfoque productivo favorece la abundancia y riqueza biótica, incrementa el carbono del suelo y mejora la rentabilidad del sistema agrícola (Smith *et al.,* 2019). De igual manera, se ha reportado que la agricultura orgánica incrementa la concentración de metabolitos secundarios beneficiosos y reduce la presencia de metales pesados y residuos de pesticidas en los cultivos (Bhattacharya *et al.,* 2024).

Los valores de pH y acidez intercambiable registrados en las cuatro parcelas de la granja se encuentran dentro de rangos adecuados para la mayoría de los cultivos, evidenciando una baja acidez que no interfiere de manera significativa en el desarrollo vegetal. La adecuada gestión de la acidez del suelo permite mantener proporciones equilibradas en la relación de saturación de cationes base, favoreciendo condiciones químicas óptimas para la nutrición vegetal (Culman *et al.,* 2021). En cuanto a la CIC, los resultados sugieren que el suelo presenta una limitada capacidad para retener y suministrar nutrientes de manera eficiente. Una CIC baja, junto con un posible desequilibrio en los cationes intercambiables, puede afectar negativamente el crecimiento de las plantas al reducir la disponibilidad efectiva de nutrientes esenciales (Yang *et al.,* 2024). En contraste, suelos con una CIC adecuada contribuyen a minimizar la pérdida de nutrientes por lixiviación y mejoran su disponibilidad para las plantas (Ćirić *et al.,* 2023).

En cuanto a los macronutrientes evaluados en el suelo de la granja, los valores de azufre (S), potasio (K) y magnesio (Mg) se encuentran dentro de rangos adecuados para el desarrollo de los cultivos. No obstante, el potasio en la parcela P1 requiere regulación, ya que un desbalance en su disponibilidad podría incrementar la susceptibilidad de las plantas a enfermedades, plagas y condiciones de estrés como sequía o bajas temperaturas. El potasio es un macronutriente esencial involucrado en múltiples procesos fisiológicos determinantes para el crecimiento vegetal (Mishra *et al.,* 2025). Su adecuada disponibilidad contribuye a mitigar el estrés abiótico, incluyendo altas temperaturas y alteraciones osmóticas asociadas a sequía o salinidad (Hernández, 2025; Zhu *et al.,* 2025). Asimismo, mejora la estabilidad de los pigmentos fotosintéticos e incrementa la tolerancia al déficit hídrico (Bhardwaj, 2025). Además, un adecuado estado nutricional de potasio favorece la resistencia frente a estreses bióticos, como enfermedades y plagas (Wang *et al.,* 2013).

Por otro lado, el fósforo (P) y el calcio (Ca) se encuentran por encima de los rangos adecuados para el desarrollo de los cultivos, por lo que su manejo requiere regulación para evitar efectos de antagonismo nutricional. Altos niveles de fósforo pueden reducir la absorción de zinc (Zn) en suelos calcáreos debido a fenómenos de antagonismo y a complejas interacciones entre el suelo, la microbiota y la planta (Yang *et al.,* 2025). Asimismo, aplicaciones excesivas de fósforo pueden influir negativamente en la disponibilidad de micronutrientes como hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn) (Jin *et al.,* 2023).

Los micronutrientes boro (B), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y hierro (Fe) se encontraron en el límite inferior del rango óptimo, lo que indica una disponibilidad marginal para el desarrollo de los cultivos. La baja disponibilidad de micronutrientes en el suelo puede afectar la productividad de los cultivos, la salud del suelo y la calidad nutricional de los productos agrícolas (Andersen, 2007; Shukla *et al.,* 2021). Asimismo, deficiencias de micronutrientes como Zn y B han sido reportadas como factores que limitan el rendimiento de los cultivos y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Rahman *et al.*, 2020; Goodarzi *et al.,* 2025).

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que la granja orgánica Clark Farm presenta características propias de un sistema agrícola diversificado y sostenible, sustentado en prácticas agronómicas integrales que favorecen la producción de alimentos en armonía con el medio ambiente. La diversificación de cultivos y la implementación de prácticas propias de la agricultura orgánica contribuyen a fortalecer la base productiva del sistema, promover el control biológico de plagas y mejorar las condiciones ecológicas del agroecosistema. Asimismo, los parámetros químicos del suelo muestran condiciones generalmente adecuadas para el desarrollo de los cultivos, particularmente en relación con el pH, la acidez intercambiable y algunos macronutrientes esenciales como azufre, potasio y magnesio.

No obstante, el análisis también revela ciertos aspectos que requieren manejo y monitoreo, como los niveles elevados de fósforo y calcio, que podrían generar antagonismos nutricionales y afectar la disponibilidad de micronutrientes. De igual manera, la presencia de micronutrientes como B, Mn, Zn, Cu y FE en el límite inferior del rango óptimo sugiere la necesidad de estrategias de manejo que permitan mantener un equilibrio nutricional adecuado

en el suelo. En este sentido, la evaluación integral de las prácticas agronómicas y de los parámetros de fertilidad del suelo confirma que Clark Farm constituye un modelo de producción orgánica con potencial para contribuir a sistemas agrícolas más saludables, productivos y sostenibles, siempre que se mantenga un manejo equilibrado de la fertilidad del suelo y de la disponibilidad de nutrientes.

Author contributions: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

EJH = Emerson Jaime-Huamán

Conceptualization: EJH

Data curation: EJH

Formal Analysis: EJH

Funding acquisition: EJH

Investigation: EJH

Methodology: EJH

Project administration: EJH

Resources: EJH

Software: EJH

Supervision: EJH

Validation: EJH

Visualization: EJH

Writing – original draft: EJH

Writing – review & editing: EJH

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alföldi, T., Fliessbach, A., Geier, U., Kilcher, L., Niggli, U., Pfiffner, L., Stolze, M., & Willer, H. (2002). *Organic agriculture, environment, and food security. Environment and Natural Resources Series No. 4.* FAO.

Andersen, P. (2007). A review of micronutrient problems in the cultivated soil of Nepal. *Mountain research and development, 27*, 331-335.

Ayaz, M., Rehman, A., Shah, T. T., & Javeed, S. A. (2023). Organic agriculture: A fountain of alternative innovations for social, economic, and environmental challenges of conventional agriculture in a developing country context. *Smart Agricultural Technology, 3*, 100101.

Batis, B. V., Perea, Y. E., Fonseca, R. R., García, Y. M. R., Suárez, E. J. R., & Miranda, O. F. (2020). Propiedades químicas del suelo en cuatro fincas de la agricultura suburbana en Santiago de Cuba. *Agrisost, 26*, 1-10.

Bhardwaj, S., Kapoor, B., Kapoor, D., Thakur, U., Dolma, Y., & Raza, A. (2025). Manifold roles of potassium in mediating drought tolerance in plants and its underlying mechanisms. *Plant Science, 35*1, 112337.

Bhattacharya, D., Tripathy, S., Swain, D. K., & Mitra, A. (2024). Can organic farming improve the soil properties, food quality and human health?. *Food and Humanity, 3,* 100398.

Cidón, C.F., Figueiró, P. S., & Schreiber, D. (2021). Benefits of organic agriculture under the perspective of the bioeconomy: A systematic review. *Sustainability, 13*, 6852.

Ćirić, V., Prekop, N., Šeremešić, S., Vojnov, B., Pejić, B., Radovanović, D., & Marinković, D. (2023). The implication of cation exchange capacity (CEC) assessment for soil quality management and improvement. *Agriculture and Forestry, 69*, 113-133.

Culman, S. W., Brock, C., Doohan, D., Jackson-Smith, D., Herms, C., Chaganti, V. N., Kleinhenz, M., Sprunger, C.D. & Spargo, J. (2021). Base cation saturation relationships versus nutrient sufficiency level: a false dichotomy in practice. *Agronomy Journal, 113*, 5623-5634.

del Pino, M. (2002). La agricultura orgánica. *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable 7,* 177-188.

Escobar-Perea, Y., Vargas-Batis, B., Ramos-García, Y. M., Rodríguez-Suárez, E. J., Osoria, O. R., & Fonseca, R. R. (2021). Propiedades físicas del suelo en cuatro fincas suburbanas de Santiago de Cuba. *Centro Agrícola, 48*, 74-78.

FAO (2018). *El trabajo de la FAO sobre agroecología. Una vía para el logro de los ODS.* https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i9021es.

Goodarzi, S., Tavanmand, A., & Shajari, H. (2025). Efecto de la diferente concentración y método de aplicación del zinc sobre el rendimiento de garbanzos (*Pisum sativum* L.). *Preprint arXiv*:2505.23855.

Hernández, A.M.P. (2025). *Modulación del ácido abscísico en plantas de tomate: respuesta integral a la combinación de estreses abióticos* (Tesis doctoral, Universidad de Murcia).

Jin, Y., Zhang, N., Chen, Y., Wang, Q., Qin, Z., Sun, Z., & Zhang, S. (2023). Quantitative evaluation of the crop yield, soil-available phosphorus, and total phosphorus leaching caused by phosphorus fertilization: A meta-analysis. *Agronomy, 13*, 2436.

Krauss, M., Berner, A., Perrochet, F., Frei, R., Niggli, U. y Mäder, P. (2020). Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years. *Scientific Report, 10*, 4403.

Lamichhane, J. R., Reay-Jones, F. P. F., & Kudsk, P. (2022). Climate change adaptation in smallholder agriculture: Adoption, barriers, determinants, and policy implications. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 27*, 52.

Lenné, J., & Wood, D. (2024). Crop diversity in agroecosystems for pest management and food production. *Plants, 13*, 1164.

Luna-González, D. V., & Sørensen, M. (2018). Higher agrobiodiversity is associated with improved dietary diversity, but not child anthropometric status, of the Mayan Achí people of Guatemala. *Public Health Nutrition, 21*, 2128-2141.

Main Cropping System Experiment (MCSE). (2023). *Composite Soil Sampling Protocol.* Michigan State University.

Mishra, S., Bisht, D., Amtmann, A., Srivastava, A. K., & Pandey, G. K. (2025). Potassium Deficiency and Hormone Signalling in Plants. *Plant, Cell & Environment, 8,* e2020EA001619.

Molina, J. E. (2021). La revolución verde como revolución tecnocientífica: artificialización de las prácticas agrícolas y sus implicaciones. *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia, 21*, 175-204.

Montgomery, D. R., & Biklé, A. (2021). Soil health and nutrient density: beyond organic vs. conventional farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 5*, 699147.

Ochieng, J., Kirimi, L., & Mathenge, M. (2022). Small-scale farming: A review of challenges and potential opportunities offered by technological advancements. *Sustainability, 15*, 15478.

Puneeth, G. M., Gowthami, R., Katral, A., Laxmisha, K. M., Vasudeva, R., Singh, G. P., & Archak, S. (2024). On-farm crop diversity, conservation, importance and value: A case study of landraces from Western Ghats of Karnataka, India. *Scientific Report, 14*, 10712.

Rahman, R., Sofi, J. A., Javeed, I., Malik, T. H., & Nisar, S. (2020). Papel de los micronutrientes en la producción de cultivos. *Revista Internacional de Microbiología Actual y Ciencias Aplicadas, 8*, 2265-2287.

Rempelos, L., Baranski, M., Wang, J., Adams, T. N., Adebusuyi, K., Beckman, J. J. & Leifert, C. (2021). Integrated soil and crop management in organic agriculture: a logical framework to ensure food quality and human health?. *Agronomy, 11*, 2494.

Salinas, E. (2014). La agricultura orgánica como modelo alternativo. M. Ramos, M. Tavera, J. Quintanilla, G. Chaparro. Y. F. Iglesias (Ed.), *Desarrollo Sustentable y Finanzas*, pp. 90-105. Editorial Ecorfan.

Scialabba, N., & Hattam, C. (Eds.). (2002). *Organic agriculture, environment, and food security*. Vol. 4. Food & Agriculture Org.

Shukla, A. K., Behera, S. K., Prakash, C., Tripathi, A., Patra, A. K., Dwivedi, B. S., Trivedi, V., Rao, S., Chaudhari, S.K., Das, S., & Singh, A. K. (2021). Deficiency of phyto-available sulfur, zinc, boron, iron, copper, and manganese in the soils of India. *Scientific Report, 11*, 19760.

Smith, O. M., Cohen, A. L., Rieser, C. J., Davis, A. G., Taylor, J. M., Adesanya, A. W., & Crowder, D. W. (2019). Organic farming provides reliable environmental benefits but increases variability in crop yields: A global meta-analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 3*, 82.

University of Massachusetts Amherst. Soil and Plant Nutrient Testing Laboratory, (2025). *Interpretation of Soil Test Results for Agronomic Crops*. Amherst, Massachusetts, Estados Unidos.

USDA (U.S. Department of Agriculture) (2020*). National Agricultural Statistics Service.* Organic survey 2019. https://www.nass.usda.gov/Data_and_Statistics/

Valenzuela, I. G., & Visconti, E. F. (2018). Influencia del clima, uso del suelo y profundidad sobre el contenido de carbono orgánico en dos pisos altitudinales andinos del departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas, 12*, 233-243.

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International journal of molecular sciences, 14*, 7370-7390.

Willer, Helga; Trávníček, Jan y Schlatter, Bernhard (eds.) (2025). *El mundo de la agricultura ecológica. Estadísticas y tendencias emergentes 2025*. Instituto

de Investigación de Agricultura Ecológica FiBL e IFOAM - Organics International, Frick y Bonn.

Yang, J., Wang, R., Xu, J., Guo, Z., Liu, C., Chen, Y., & Wang, Z. (2025). Mitigating phosphorus–zinc antagonism in calcareous soils through the interaction of high–zinc wheat and the rhizospheric microbiome. *Field Crops Research, 322*, 109762.

Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., & Zhao, G. (2024). Effects of balancing exchangeable cations Ca, Mg, and K on the growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) based on increased soil cation exchange capacity. *Agronomy, 14*, 629.

Zhu, L., Sun, Y., Wang, R., Zeng, J., Li, J., Huang, M., Wang, M., Shen, Q., & Guo, S. (2025). Applied potassium negates osmotic stress impacts on plant physiological processes: a meta-analysis. *Horticulture Research, 12*, uhae318.

Received Mar 27, 2026.

Accepted May 23, 2026.