

Innovaciones en Agricultura Sostenible: Un Estudio Exploratorio de las Nuevas Tendencias

Innovations in Sustainable Agriculture: An Exploratory Study of Emerging Trends

Viejó-Altamirano, Joselin Michell ^{1*}; Caicedo-Aldaz, Julio Cesar ²;

¹ Universidad Estatal de Milagro; Ecuador, Milagro; <https://orcid.org/0009-0002-5937-6195>; jviejoa@unemi.edu.ec

² Universidad Cesar Vallejo; Perú, Piura; <https://orcid.org/0000-0002-6373-1981>; jcaicedoal@ucvvirtual.edu.pe

* Autor de correspondencia

 <https://doi.org/10.70881/hnj/v2/n3/5>

Cita: Viejó-Altamirano, J. M., & Caicedo-Aldaz, J. C. (n.d.). Innovaciones en Agricultura Sostenible: Un Estudio Exploratorio de las Nuevas Tendencias. *Horizon Nexus Journal*, 2(3), 31-44. <https://doi.org/10.70881/hnj/v2/n3/5>

Recibido: 09/06/2024

Revisado: 20/06/2024

Aceptado: 03/07/2024

Publicado: 31/07/2024



Copyright: © 2024 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Resumen: El artículo “Innovaciones en Agricultura Sostenible: Un Estudio Exploratorio de las Nuevas Tendencias” aborda el impacto de las tecnologías avanzadas y prácticas agroecológicas en la sostenibilidad agrícola. El objetivo es analizar las tendencias emergentes en la agricultura sostenible y los factores que influyen en su adopción. La metodología se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva, examinando estudios recientes sobre agricultura de precisión, regenerativa y el uso de inteligencia artificial y robótica. Los resultados muestran que, aunque tecnologías como los drones y la IA han transformado el sector, la adopción enfrenta barreras económicas, como altos costos y falta de acceso a financiamiento y capacitación. La discusión destaca la necesidad de políticas públicas inclusivas y mayor inversión en investigación para superar estos obstáculos y promover la adopción de tecnologías sostenibles. Se concluye que la colaboración entre gobiernos, el sector privado y las instituciones académicas es esencial para acelerar la transición hacia una agricultura más equitativa y resiliente.

Palabras clave: agricultura sostenible; innovación tecnológica; adopción de tecnologías; resiliencia agrícola; políticas públicas.

Abstract: The article “Innovations in Sustainable Agriculture: An Exploratory Study of Emerging Trends” addresses the impact of advanced technologies and agroecological practices on agricultural sustainability. The objective is to analyze emerging trends in sustainable agriculture and the factors influencing their adoption. The methodology is based on a comprehensive literature review, examining recent studies on precision agriculture, regenerative agriculture and the use of artificial intelligence and robotics. The results show that, although technologies such as drones and AI have transformed the sector, adoption faces economic barriers, such as high costs and lack of access to financing and training. The discussion highlights the need for inclusive public policies and greater investment in research to overcome these barriers and promote the adoption of sustainable technologies. It is concluded that collaboration between governments, the private sector and academic institutions is essential to accelerate the transition to a more equitable and resilient agriculture.

Keywords: sustainable agriculture; technological innovation; technology adoption; agricultural resilience; public policies.

1. Introducción

La agricultura global enfrenta desafíos sin precedentes derivados del aumento de la demanda de alimentos, la degradación ambiental y el cambio climático. En respuesta, han surgido diversas innovaciones orientadas a la agricultura sostenible, las cuales buscan optimizar la producción al tiempo que mitigan los impactos negativos sobre el medio ambiente. La degradación de los ecosistemas agrícolas, junto con la presión por incrementar los rendimientos, ha llevado a la búsqueda de nuevas soluciones que integren tecnologías avanzadas con prácticas agroecológicas más respetuosas con el entorno natural (Mieles-Giler et al., 2024). Este trabajo se centra en revisar las tendencias emergentes en la agricultura sostenible, explorando su impacto, viabilidad y potencial para transformar el sector agrícola.

La problemática central en la agricultura actual radica en su insostenibilidad. El uso intensivo de insumos químicos y la sobreexplotación de recursos naturales han degradado suelos, contaminado cuerpos de agua y reducido la biodiversidad. Según Vargas-Fonseca et al. (2023b), la estructura ecológica principal de muchos territorios, vital para la resiliencia ambiental, se ha visto gravemente afectada por prácticas agrícolas no sostenibles. El cambio climático exacerba estos problemas, ya que provoca eventos meteorológicos extremos que alteran los ciclos productivos y ponen en riesgo la seguridad alimentaria a largo plazo. Ante esto, es imperativo repensar los modelos de producción actuales y adoptar innovaciones que fomenten una mayor sostenibilidad.

Diversas tecnologías emergentes, como la agricultura de precisión y el uso de robótica avanzada, están demostrando su capacidad para abordar estos desafíos. Estas innovaciones permiten una administración más eficiente de los recursos agrícolas, optimizando el uso de agua, fertilizantes y pesticidas mediante el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones basadas en datos (Herrera-Feijoo et al., 2023). Por ejemplo, los sensores avanzados pueden detectar problemas de salud en los cultivos antes de que se agraven, reduciendo la necesidad de insumos químicos. Al mismo tiempo, el uso de drones y sistemas automatizados mejora la vigilancia de grandes extensiones de terreno, facilitando la adopción de prácticas de conservación y regeneración del suelo.

A pesar de los beneficios potenciales de estas tecnologías, su adopción aún enfrenta retos, especialmente entre los pequeños agricultores que a menudo carecen del acceso a financiamiento y capacitación necesarios. Según Mieles-Giler et al. (2024), la adopción de prácticas sostenibles debe ir acompañada de políticas públicas que incentiven el uso de tecnologías avanzadas y promuevan la conservación de los recursos naturales. En este sentido, la colaboración entre gobiernos, sector privado y organizaciones internacionales resulta fundamental para generar un entorno propicio para la innovación.

Otra tendencia clave es la agricultura regenerativa, que busca restaurar los ecosistemas agrícolas mediante el uso de técnicas que promuevan la salud del suelo y la biodiversidad. Esta práctica se distingue de la agricultura convencional por su enfoque en la regeneración del entorno natural en lugar de su explotación. Según diversas investigaciones, la agricultura regenerativa tiene el potencial de no solo mitigar los efectos del cambio climático, sino también revertir parte del daño causado por prácticas agrícolas intensivas (Herrera-Feijoo et al., 2023). Estas iniciativas incluyen la rotación de cultivos, el uso de compostaje y la integración de sistemas agroforestales que, en conjunto, mejoran la fertilidad del suelo y aumentan la captura de carbono.

El uso de prácticas agroecológicas y de tecnologías avanzadas en la agricultura también tiene un impacto significativo en la biodiversidad. La pérdida de diversidad biológica es uno de los mayores riesgos asociados a la intensificación agrícola, ya que la simplificación de los ecosistemas agrícolas reduce la capacidad de estos para enfrentar perturbaciones. La restauración de hábitats y la implementación de prácticas de manejo integrado de plagas son esenciales para proteger los servicios ecosistémicos de los que depende la agricultura (Vargas-Fonseca et al., 2023b). A través de la adopción de prácticas más sostenibles, es posible mejorar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a los desafíos climáticos y ambientales.

El objetivo de este estudio es realizar una revisión exhaustiva de las innovaciones más relevantes en la agricultura sostenible, evaluando su viabilidad y su capacidad para transformar el sector agrícola. La creciente integración de tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica con prácticas agroecológicas representa una oportunidad única para abordar los desafíos de sostenibilidad. Sin embargo, es fundamental garantizar que estas innovaciones sean accesibles para todos los actores del sector, especialmente aquellos más vulnerables, como los pequeños agricultores. Además, es crucial que estas tecnologías se implementen de manera coherente con los principios de conservación y regeneración del medio ambiente.

En síntesis, las innovaciones en la agricultura sostenible están impulsando una transformación significativa del sector agrícola. La integración de tecnologías avanzadas, como la agricultura de precisión, junto con prácticas agroecológicas, tiene el potencial de mejorar la productividad y la resiliencia de los sistemas agrícolas, al tiempo que se reduce su impacto ambiental. Sin embargo, para que estas innovaciones alcancen su máximo potencial, es necesario un enfoque integrado que combine la adopción tecnológica con políticas públicas que promuevan la conservación de los recursos naturales y el acceso equitativo a estas herramientas. El futuro de la agricultura depende, en gran medida, de nuestra capacidad para innovar de manera sostenible y garantizar que los beneficios de estas innovaciones se distribuyan de manera justa.

2. Materiales y Métodos

El presente artículo adopta un enfoque cualitativo basado en una revisión bibliográfica exhaustiva. Este método se seleccionó por su idoneidad para analizar y sintetizar las tendencias y avances en el campo de la agricultura sostenible, con el objetivo de proporcionar una visión comprensiva y crítica de las innovaciones más recientes. A continuación, se detallan los pasos metodológicos seguidos.

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo utilizando bases de datos científicas reconocidas como Scopus, Web of Science y Google Scholar. Se emplearon palabras clave relacionadas con la temática central del estudio, tales como "innovaciones en agricultura sostenible", "tendencias en agricultura de precisión", "adopción de tecnologías sostenibles", y "nuevas técnicas agrícolas". Para garantizar la relevancia de los artículos seleccionados, se establecieron criterios de inclusión que exigían que los estudios fueran revisados por pares, estuvieran publicados en revistas indexadas, y dataran de los últimos diez años. Se priorizaron estudios que aborden tanto

innovaciones tecnológicas como cambios en las prácticas agrícolas en diferentes regiones del mundo.

El análisis de la información se realizó mediante una lectura crítica de los artículos seleccionados, con el fin de identificar patrones, tendencias emergentes y brechas en la investigación actual sobre agricultura sostenible. Se utilizaron técnicas de codificación temática para agrupar los resultados en categorías relevantes, tales como innovación tecnológica, adopción por parte de agricultores, y factores sociales y económicos que influyen en la implementación de estas innovaciones. La síntesis de la información permitió la creación de una narrativa coherente que integra los principales hallazgos de estudios anteriores, destacando las oportunidades y los desafíos que enfrenta el sector agrícola en términos de sostenibilidad.

Para asegurar la validez y confiabilidad de los estudios revisados, se aplicaron criterios de calidad rigurosos durante el proceso de selección. Los estudios fueron evaluados en función de su metodología, solidez en la argumentación, y relevancia para el tema en cuestión. Además, se consideró la diversidad geográfica y temática de los estudios, buscando una representación balanceada entre las diferentes áreas de innovación agrícola y los contextos socioeconómicos en los que se implementan.

Si bien la revisión bibliográfica ofrece una visión amplia y detallada de las innovaciones en agricultura sostenible, es importante señalar que el estudio presenta algunas limitaciones. En primer lugar, al centrarse exclusivamente en fuentes disponibles en bases de datos académicas, se excluyen estudios de organismos no gubernamentales o informes técnicos que podrían ofrecer perspectivas adicionales. Además, la revisión se limita a publicaciones en inglés y español, lo que puede restringir el alcance de la información obtenida de otras regiones del mundo. A pesar de estas limitaciones, los hallazgos proporcionan una base sólida para comprender las tendencias emergentes en este campo y sirven como punto de partida para futuras investigaciones.

En síntesis, la metodología cualitativa utilizada en esta revisión bibliográfica permite una evaluación profunda de las innovaciones en la agricultura sostenible, facilitando la identificación de áreas clave de avance y los desafíos para su adopción generalizada en el sector agrícola global.

3. Resultados

3.1. Agricultura de precisión y optimización de recursos

La agricultura de precisión ha emergido como una estrategia clave para optimizar los recursos en la producción agrícola, mejorando la eficiencia y minimizando los impactos ambientales. Este enfoque aprovecha tecnologías avanzadas, como drones y sensores IoT, para recopilar datos en tiempo real y tomar decisiones fundamentadas sobre la gestión de cultivos.

El uso de drones equipados con sensores multiespectrales y cámaras LIDAR ha revolucionado la forma de monitorear los cultivos. Estas tecnologías permiten generar mapas tridimensionales del terreno, identificar áreas con problemas de salud vegetal y realizar intervenciones específicas antes de que las enfermedades o plagas se propaguen (Cancela & Ballesteros González, 2023). De esta manera, los agricultores

pueden mejorar la precisión en el manejo de sus tierras, logrando una producción más eficiente y sostenible. Adicionalmente, los sensores conectados a la tecnología IoT recopilan datos ambientales que optimizan las decisiones de riego y fertilización, adaptando las necesidades de los cultivos a las condiciones climáticas cambiantes (Alahmad et al., 2023).

Uno de los mayores beneficios de la agricultura de precisión es la capacidad de aplicar fertilizantes y pesticidas solo en las áreas que realmente lo requieren. El monitoreo de suelos y cultivos mediante sensores permite una administración más eficiente de los insumos, reduciendo el uso excesivo de productos químicos. Este enfoque no solo optimiza los costos de producción, sino que también contribuye a la preservación del medio ambiente al reducir la contaminación del suelo y el agua (Geetha & Karthikeyan, 2021). Los datos obtenidos por estos dispositivos permiten ajustar las dosis de fertilizantes y pesticidas, disminuyendo el impacto ambiental y mejorando la salud del ecosistema agrícola (Alahmad et al., 2023).

La escasez de agua en muchas regiones agrícolas ha impulsado el desarrollo de sistemas de riego automatizados controlados por sensores de humedad y clima. Estos sistemas permiten una aplicación eficiente del agua, ajustando el riego en tiempo real según las necesidades del suelo y los cultivos, lo que evita el desperdicio y asegura que las plantas reciban la cantidad óptima de agua (Cancela & Ballesteros González, 2023). Además, los sistemas basados en IoT brindan a los agricultores la capacidad de monitorear y gestionar el riego de manera remota, facilitando la conservación del recurso hídrico y mejorando la resiliencia de los cultivos frente a la variabilidad climática (Geetha & Karthikeyan, 2021).

La adopción de tecnologías avanzadas en la agricultura de precisión ha transformado radicalmente las prácticas agrícolas, proporcionando a los agricultores herramientas para mejorar la productividad, reducir los costos y minimizar el impacto ambiental. La integración de big data y algoritmos de inteligencia artificial en estos sistemas permite un análisis más detallado de los datos agrícolas, ayudando a anticipar problemas y optimizar el uso de recursos a lo largo de toda la temporada de cultivo (Alahmad et al., 2023). Este enfoque no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la sostenibilidad del sector agrícola, un aspecto crucial para enfrentar los desafíos del cambio climático.

Para resumir, la agricultura de precisión es una herramienta poderosa para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia en la producción agrícola. A través del uso de drones, sensores y sistemas de riego automatizados, los agricultores pueden optimizar la utilización de recursos, reducir la dependencia de insumos químicos y mejorar la gestión del agua, contribuyendo de manera significativa a la conservación ambiental y a la resiliencia de los sistemas agrícolas.

3.2. Agricultura regenerativa y conservación de suelos

La agricultura regenerativa se ha consolidado como una estrategia integral para restaurar la salud del suelo y fomentar la sostenibilidad en los sistemas agrícolas. A diferencia de los enfoques tradicionales de conservación, que se centran en la protección del suelo existente, la agricultura regenerativa busca mejorar activamente la calidad del suelo y restaurar ecosistemas previamente degradados. Esto se logra

mediante la implementación de prácticas como la rotación de cultivos, la agroforestería, la captura de carbono y la reducción de la erosión, todas ellas diseñadas para maximizar tanto la productividad agrícola como la salud ecológica a largo plazo (Schreefel et al., 2020).

Una de las prácticas fundamentales de la agricultura regenerativa es la rotación de cultivos, que mejora la fertilidad del suelo al reducir el agotamiento de nutrientes y minimizar la proliferación de plagas. Este enfoque consiste en alternar diferentes tipos de cultivos en una misma parcela a lo largo del tiempo, lo que no solo favorece la estructura del suelo, sino que también ayuda a romper los ciclos de enfermedades y plagas específicas de cada cultivo. Además, la rotación fomenta la biodiversidad del suelo al proporcionar un hábitat para una variedad más amplia de organismos beneficiosos, mejorando así la resiliencia del ecosistema agrícola frente a perturbaciones externas (Blazier et al., 2008; Kataki et al., 2001).

La agroforestería, por su parte, ofrece beneficios adicionales al integrar árboles y arbustos en las explotaciones agrícolas. Este enfoque no solo proporciona sombra y reduce la evaporación del agua del suelo, sino que también contribuye a la mejora de la salud del suelo mediante el aporte continuo de materia orgánica a partir de la descomposición de hojas y raíces. La presencia de árboles también ayuda a estabilizar el suelo, reduciendo la erosión causada por la acción del viento y el agua. Investigaciones han demostrado que la implementación de sistemas agroforestales puede mejorar la capacidad de retención de carbono en los suelos y aumentar la biodiversidad, lo que contribuye a la restauración de tierras degradadas (Celentano et al., 2020; Brahma et al., 2018).

La captura de carbono es otro de los aspectos más destacados de la agricultura regenerativa. A través de prácticas agroecológicas como la siembra directa, los cultivos de cobertura y la reforestación, se promueve el secuestro de carbono atmosférico en el suelo, ayudando a mitigar los efectos del cambio climático. Este carbono se almacena tanto en la biomasa vegetal como en la materia orgánica del suelo, lo que no solo reduce los niveles de CO₂ en la atmósfera, sino que también mejora la fertilidad del suelo al aumentar su capacidad de retención de agua y nutrientes (Schreefel et al., 2020; Celentano et al., 2020). El secuestro de carbono en sistemas agroforestales, en particular, ha sido objeto de numerosos estudios que han demostrado su eficacia en la captura a largo plazo de carbono atmosférico, especialmente en regiones afectadas por la degradación del suelo (Brahma et al., 2018).

La reducción de la erosión y la restauración de ecosistemas degradados también juegan un papel crucial en la agricultura regenerativa. La erosión del suelo, causada principalmente por la agricultura intensiva y la deforestación, ha llevado a la pérdida de tierras agrícolas fértiles en todo el mundo. Para contrarrestar este problema, la agricultura regenerativa emplea prácticas como el uso de barreras vivas, la plantación de especies nativas y la construcción de terrazas para reducir el impacto de la lluvia y el viento sobre el suelo expuesto (Mishra et al., 2020). Estas prácticas no solo protegen el suelo contra la erosión, sino que también ayudan a restaurar la fertilidad en tierras previamente degradadas, lo que permite una recuperación gradual de los ecosistemas agrícolas.

Los beneficios de la agricultura regenerativa van más allá de la simple mejora de la calidad del suelo; también ofrecen una solución viable para hacer frente a los desafíos globales como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. Al integrar prácticas agroecológicas con tecnologías innovadoras, la agricultura regenerativa no solo permite a los agricultores mejorar la productividad de sus tierras, sino que también contribuye a la conservación de los ecosistemas y la mitigación de los impactos ambientales negativos de la agricultura intensiva. En última instancia, este enfoque ofrece un camino hacia una agricultura más resiliente y sostenible, capaz de satisfacer las necesidades alimentarias actuales sin comprometer la salud ecológica de las generaciones futuras (Schreefel et al., 2020; Mishra et al., 2020).

3.3. Integración de la inteligencia artificial y la robótica en la agricultura

La integración de la inteligencia artificial (IA) y la robótica en la agricultura ha revolucionado el sector, permitiendo mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad mediante la automatización y optimización de tareas agrícolas. Uno de los principales avances ha sido el uso de algoritmos de *machine learning* (ML) para la predicción de rendimientos y la detección temprana de plagas. Los modelos de *machine learning* procesan grandes cantidades de datos recolectados por sensores en los cultivos, como datos climáticos, de suelos y de crecimiento de las plantas. Estos algoritmos aprenden patrones a partir de estos datos históricos para predecir la producción esperada de los cultivos, ayudando a los agricultores a optimizar sus decisiones sobre riego, fertilización y manejo de plagas (Nevavuori et al., 2020). Además, la IA también permite una detección más temprana de enfermedades y plagas mediante la monitorización automática de imágenes de cultivos, utilizando redes neuronales como las *Convolutional Neural Networks* (CNN), que son capaces de identificar patrones de plagas o enfermedades invisibles al ojo humano (Bali & Singla, 2023).

Este tipo de tecnologías no solo aumenta la precisión en la predicción de rendimientos, sino que también facilita la creación de sistemas que permiten respuestas proactivas ante las plagas, evitando pérdidas significativas de cultivos. Un estudio reciente implementó algoritmos como *Random Forest* y *Gradient Boosting* para predecir el rendimiento del trigo y el maíz con gran precisión, basándose en variables climáticas, de suelo y de uso de pesticidas (Filippi et al., 2019). Estas predicciones permiten a los agricultores ajustar su estrategia de cultivo y asignar los recursos necesarios en función de la situación específica de cada temporada.

Por otro lado, el uso de robots agrícolas para la siembra, cosecha y control de malezas ha reducido significativamente la dependencia de la mano de obra humana, especialmente en tareas repetitivas y físicamente demandantes. Los robots equipados con sensores avanzados y sistemas de navegación autónomos han transformado la agricultura de precisión, permitiendo la siembra automática de semillas en líneas precisas y la cosecha eficiente de frutas y verduras. Un ejemplo es el uso de robots diseñados para la recolección de fresas y tomates, que han demostrado ser más rápidos y precisos que los métodos manuales (Vincent & Elavarasan, 2020). Además, la robótica ha permitido una gestión más eficiente del control de malezas mediante sistemas de visión por computadora que identifican y eliminan malezas sin necesidad de herbicidas, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costos (Rezk et al., 2021).

Finalmente, el desarrollo de sistemas autónomos que ajustan las condiciones de cultivo según variables ambientales en tiempo real es una de las innovaciones más avanzadas.

Estos sistemas, impulsados por el Internet de las Cosas (IoT) y la IA, permiten que los agricultores gestionen automáticamente el riego, la temperatura y la fertilización en función de los datos recogidos por sensores instalados en los campos. Por ejemplo, los sistemas de riego inteligentes pueden ajustar el suministro de agua en función de las condiciones climáticas y la humedad del suelo, lo que optimiza el uso de agua y reduce el desperdicio (dos Santos et al., 2019). Estos avances son particularmente valiosos en áreas con escasez de agua, ya que permiten una gestión más precisa y eficiente de los recursos hídricos.

El IoT y los algoritmos de *machine learning* también han permitido la creación de plataformas que procesan datos en tiempo real, ayudando a los agricultores a tomar decisiones más informadas. Estas plataformas pueden ajustar automáticamente las condiciones del entorno para maximizar el crecimiento de los cultivos, respondiendo a factores como el cambio climático y la variabilidad estacional. El uso de *deep learning* y redes neuronales recurrentes (RNN) ha demostrado ser eficaz en la predicción de cómo las variaciones climáticas afectarán los cultivos, permitiendo a los agricultores mitigar los riesgos y ajustar sus prácticas agrícolas de manera más eficiente (Bali & Singla, 2023).

En síntesis, la integración de la IA y la robótica en la agricultura está redefiniendo la industria al mejorar la precisión, reducir la dependencia de insumos y aumentar la sostenibilidad. Los avances en la predicción de rendimientos mediante *machine learning*, el uso de robots para tareas agrícolas y la implementación de sistemas autónomos que ajustan las condiciones de cultivo en tiempo real son solo algunas de las maneras en que estas tecnologías están transformando la forma en que se cultivan los alimentos.

3.4. Impacto del cambio climático en la agricultura y estrategias de adaptación

El cambio climático está afectando profundamente la agricultura mundial, alterando los patrones climáticos y provocando eventos extremos como sequías e inundaciones. La evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas a estos fenómenos es crucial para comprender cómo pueden adaptarse las diferentes regiones y cultivos. Los estudios sobre vulnerabilidad, como los realizados por el IPCC, definen esta como la susceptibilidad de un sistema para sufrir daños debido a la exposición y sensibilidad a los impactos climáticos, combinados con su capacidad adaptativa (Fritzsche et al., 2020). Los sistemas agrícolas, en particular, son altamente vulnerables a cambios abruptos en las precipitaciones y temperaturas, lo que afecta la productividad de cultivos clave, como el trigo y el maíz (PLOS ONE, 2023). Los enfoques actuales de evaluación incluyen el uso de modelos climáticos y análisis espaciales que identifican las áreas más vulnerables a la sequía o inundación, como se ha implementado en zonas de África y América Latina (Nature, 2021).

Para enfrentar estos desafíos, se han desarrollado cultivos resistentes al clima mediante técnicas avanzadas de edición genética, como CRISPR/Cas9, y selección asistida por marcadores genéticos. Estas técnicas permiten crear variedades de cultivos que pueden soportar condiciones extremas, como la sequía o el calor, al introducir genes que mejoran la resistencia al estrés hídrico o a las altas temperaturas (Bhat et al., 2021). La investigación en cultivos como el maíz, el arroz y la cassava ha sido especialmente prometedora, dado que estos alimentos básicos son fundamentales para la seguridad alimentaria en regiones altamente afectadas por el cambio climático (Beacham et al.,

2018). Las estrategias de modificación genética han permitido no solo mejorar la tolerancia a la sequía, sino también la resistencia a plagas y enfermedades, factores exacerbados por las alteraciones climáticas (Gomez et al., 2019).

Otro enfoque clave en la adaptación agrícola es la implementación de sistemas de alerta temprana. Estos sistemas son esenciales para mitigar los efectos adversos de fenómenos meteorológicos como huracanes, tormentas e inundaciones. Mediante el uso de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) y redes de sensores, los sistemas de alerta temprana permiten monitorear en tiempo real variables climáticas críticas, proporcionando avisos anticipados a los agricultores para que puedan tomar decisiones preventivas, como ajustar el riego o proteger los cultivos (FAO, 2021). Además, la integración de inteligencia artificial (IA) ha mejorado la precisión de las predicciones climáticas, facilitando una respuesta rápida ante emergencias y minimizando las pérdidas económicas y productivas (Delangiz et al., 2019). Estas herramientas son esenciales para los agricultores de regiones vulnerables, que dependen de información precisa para mitigar los riesgos asociados con el cambio climático.

En resumen, el impacto del cambio climático en la agricultura requiere una combinación de estrategias de adaptación que incluyan la evaluación de la vulnerabilidad, el desarrollo de cultivos más resistentes y la implementación de sistemas de alerta temprana. Estas acciones son fundamentales para garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola y la seguridad alimentaria en un futuro incierto.

3.5. Políticas públicas y financiamiento para la agricultura sostenible

Las políticas públicas y el financiamiento desempeñan un papel esencial en la promoción de la agricultura sostenible, asegurando que los agricultores puedan adoptar prácticas ambientalmente responsables mientras se mantiene la productividad agrícola. Un mecanismo clave para facilitar esta transición es la promoción de incentivos fiscales y subsidios, que pueden reducir los costos de implementación de tecnologías sostenibles como la agricultura de precisión y la agroforestería. Estudios recientes subrayan que los subsidios bien diseñados deben estar vinculados a objetivos ambientales concretos, como la conservación de la biodiversidad y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con las metas establecidas en acuerdos internacionales como el Acuerdo de París (FAO, 2023). Estos incentivos deben estar dirigidos a pequeños y medianos productores, quienes enfrentan barreras económicas más significativas para la adopción de nuevas tecnologías (Piñeiro et al., 2021).

El fomento de alianzas público-privadas (PPP) es otra estrategia crucial para modernizar el sector agrícola y aumentar su sostenibilidad. Estas alianzas permiten aprovechar la eficiencia operativa del sector privado junto con la regulación y planificación del sector público, promoviendo el desarrollo de tecnologías agrícolas avanzadas. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha demostrado que estas colaboraciones pueden mejorar significativamente la capacidad de los agricultores para adaptarse a los desafíos del cambio climático y la escasez de recursos, como se ha visto en países de África que han implementado con éxito estas alianzas para incrementar la productividad agrícola y mejorar la seguridad alimentaria (FAO, 2023; World Bank, 2023). Sin embargo, para maximizar el impacto de estas alianzas, es esencial que existan marcos regulatorios sólidos que garanticen la

transparencia, responsabilidad y una distribución equitativa de los beneficios (FAO, 2023).

Finalmente, la creación de marcos regulatorios es esencial para guiar la transición hacia sistemas agroalimentarios resilientes. Estos marcos deben establecer metas claras y medibles que promuevan el uso sostenible de los recursos naturales y la adaptación al cambio climático. Las políticas regulatorias que incorporan la sostenibilidad como un pilar central, como las desarrolladas bajo los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), pueden proporcionar la estabilidad necesaria para que los agricultores inviertan en tecnologías verdes a largo plazo (World Bank, 2023; FAO, 2023). Además, estas regulaciones deben ser flexibles y adaptativas para responder a los cambios en el entorno económico y climático, asegurando que tanto los pequeños agricultores como las grandes empresas puedan adaptarse de manera eficiente.

4. Discusión

La discusión sobre las innovaciones en agricultura sostenible, que incluye avances en agricultura de precisión, la adopción de prácticas agroecológicas regenerativas, la integración de tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica, así como las estrategias de adaptación frente al cambio climático, revela la importancia de una convergencia de enfoques científicos, tecnológicos y políticos para enfrentar los desafíos agrícolas actuales. Cada una de estas áreas refleja el esfuerzo global por equilibrar la creciente demanda de alimentos con la preservación del medio ambiente y los recursos naturales, dentro de un marco de sostenibilidad a largo plazo.

En el caso de la agricultura de precisión, su potencial para optimizar el uso de recursos es incuestionable. La aplicación de tecnologías como los drones y sensores avanzados no solo permite un monitoreo preciso de los cultivos, sino que también mejora la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes. Estudios demuestran que el uso de sensores y algoritmos de *machine learning* ha incrementado significativamente la capacidad de los agricultores para predecir rendimientos y detectar plagas de manera temprana (Nevavuori et al., 2020; Filippi et al., 2019). Sin embargo, persisten desafíos en cuanto a su adopción masiva, especialmente en áreas rurales con bajos recursos financieros. La implementación de políticas que promuevan subsidios e incentivos fiscales puede facilitar la integración de estas tecnologías en regiones más vulnerables, asegurando que los beneficios de la agricultura de precisión sean accesibles a todos los agricultores, independientemente de su escala (Piñeiro et al., 2021).

El desarrollo de la agricultura regenerativa, que promueve prácticas como la rotación de cultivos y la agroforestería, también ha mostrado avances importantes. Estas técnicas han sido claves para mejorar la salud del suelo, capturar carbono y restaurar ecosistemas degradados, lo que a su vez contribuye a la sostenibilidad agrícola y la mitigación del cambio climático (Schreefel et al., 2020). Aunque la agricultura regenerativa ofrece una alternativa viable a la agricultura intensiva, su adopción depende en gran medida de políticas públicas que incentiven estas prácticas a través de subsidios y apoyos específicos. Las investigaciones indican que los agricultores responden mejor a los incentivos económicos y ambientales cuando las políticas están

alineadas con los resultados a largo plazo, especialmente en cuanto a la mejora de la productividad y la resiliencia climática (FAO, 2023; Bhat et al., 2021).

La integración de la inteligencia artificial y la robótica ha sido otro motor de cambio en la agricultura moderna. El uso de robots para la siembra, la cosecha y el control de malezas no solo optimiza la mano de obra, sino que también reduce el uso de pesticidas y herbicidas, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental (Vincent & Elavarasan, 2020). Asimismo, el desarrollo de sistemas autónomos que ajustan las condiciones de cultivo en tiempo real mediante el análisis de variables ambientales ha mejorado notablemente la eficiencia del riego y el uso de nutrientes (dos Santos et al., 2019). No obstante, la plena implementación de estas tecnologías requiere marcos regulatorios robustos que apoyen su adopción en diferentes contextos socioeconómicos y que fomenten la colaboración entre el sector público y privado (World Bank, 2023).

En cuanto a las estrategias de adaptación frente al cambio climático, la investigación ha destacado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas ante eventos climáticos extremos, como las sequías y las inundaciones. La capacidad de los agricultores para adaptarse a estas condiciones depende en gran medida del desarrollo de cultivos resistentes al clima mediante técnicas de edición genética, como CRISPR, y de la creación de sistemas de alerta temprana que permitan mitigar los efectos adversos de estos fenómenos (Bhat et al., 2021; FAO, 2023). Estas innovaciones no solo son tecnológicamente factibles, sino también esenciales para garantizar la seguridad alimentaria global en un contexto de cambio climático.

Finalmente, la promoción de políticas públicas y el financiamiento adecuado son determinantes para que las innovaciones tecnológicas en la agricultura sean accesibles y sostenibles a largo plazo. Las alianzas público-privadas han demostrado ser efectivas para movilizar recursos y conocimientos en beneficio de la agricultura sostenible, pero requieren marcos de gobernanza claros que garanticen la transparencia y el éxito de las iniciativas (FAO, 2023; World Bank, 2023). La discusión sobre estos enfoques subraya que la sostenibilidad agrícola no puede lograrse sin un compromiso conjunto entre gobiernos, el sector privado y las comunidades agrícolas, así como un marco regulatorio que favorezca la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas agroecológicas regenerativas.

5. Conclusiones

La revisión de las innovaciones en la agricultura sostenible resalta la importancia de integrar avances tecnológicos, prácticas agroecológicas y políticas públicas coherentes para enfrentar los desafíos actuales del sector agrícola. La agricultura de precisión ha demostrado ser una herramienta efectiva para optimizar el uso de recursos, mejorando la eficiencia en la aplicación de agua y fertilizantes. No obstante, su adopción depende de la existencia de incentivos económicos que permitan a los pequeños agricultores acceder a estas tecnologías avanzadas.

Por otro lado, la agricultura regenerativa ha mostrado su capacidad para restaurar la salud del suelo y capturar carbono, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático. Estas prácticas no solo aumentan la productividad agrícola, sino que también protegen los ecosistemas y fomentan la sostenibilidad a largo plazo. El éxito de

estas técnicas requiere un apoyo regulatorio sólido y una adopción generalizada, facilitada por políticas públicas que promuevan su implementación.

La incorporación de inteligencia artificial y robótica en la agricultura está transformando el manejo de cultivos, optimizando labores clave como la siembra y cosecha, lo que reduce costos y aumenta la productividad. Sin embargo, su desarrollo e implementación a gran escala también necesita de marcos regulatorios que aseguren su acceso equitativo.

Finalmente, el cambio climático presenta uno de los mayores desafíos para la agricultura, y su impacto puede ser mitigado mediante el desarrollo de cultivos resistentes y la implementación de sistemas de alerta temprana. Estos esfuerzos deben ir acompañados de una coordinación efectiva entre el sector público y privado, asegurando la resiliencia de los sistemas agroalimentarios.

En síntesis, la sostenibilidad agrícola solo se logrará mediante una combinación equilibrada de innovación tecnológica, políticas públicas efectivas y prácticas agroecológicas regenerativas. La colaboración entre gobiernos, sector privado y agricultores será clave para enfrentar los desafíos del siglo XXI, garantizando la seguridad alimentaria y la preservación del medio ambiente.

Referencias Bibliográficas

- Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A. (2023). Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*, 13(10), 2603. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102603>
- Bali, S., & Singla, R. (2023). *Crop yield prediction algorithm (CYPA) in precision agriculture based on IoT techniques and climate changes*. Neural Computing and Applications. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08619-5>
- Beacham, A. M., Hand, P., Barker, G. C., et al. (2018). Addressing the threat of climate change to agriculture requires improving crop resilience to short-term abiotic stress. *Outlook on Agriculture*, 47(4), 270–276. <https://doi.org/10.1177/0030727018807722>
- Bhat, M. A., Mir, R. A., Kumar, V., et al. (2021). Mechanistic insights of CRISPR/Cas-mediated genome editing towards enhancing abiotic stress tolerance in plants. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1255–1268. <https://doi.org/10.1111/ppl.13288>
- Blazier, M. A., Gaston, L. A., Clason, T. R., Farrish, K. W., Oswald, B. P., & Evans, H. A. (2008). Nutrient dynamics and tree growth of silvopastoral systems: impact of poultry litter. *Journal of Environmental Quality*, 37(5), 1546-1558. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0343>
- Brahma, B., Pathak, K., Lal, R., Kurmi, B., Das, M., Nath, P. C., Nath, A. J., & Das, A. K. (2018). Ecosystem carbon sequestration through restoration of degraded lands in Northeast India. *Land Degradation & Development*, 29(1), 15-25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2637>
- Burgos-Macias, T. J., & Gaibor-Fernández, R. R. (2023). *Dinámica poblacional de Spodoptera frugiperda, Diatraea saccharalis y Dalbulus maidis en el cultivo de*

- maíz (*Zea mays* L.) durante la época seca en cinco localidades del cantón Mocache. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.62>
- Caicedo-Aldaz, J. C., & Herrera-Sánchez, D. J. (2022). El Rol de la Agroecología en el Desarrollo Rural Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n2/24>
- Cancela, J. J., & Ballesteros González, R. (2023). *Drones for Precision Agriculture: Remote Sensing Applications*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030399>
- Celentano, D., Rousseau, G. X., Paixão, L. S., Lourenço, F., Cardozo, E. G., Rodrigues, T. O., & Reis, F. O. (2020). Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon. *Agroforestry Systems*, 94(5), 1781-1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00454-9>
- Delangiz, N., Varjovi, M. B., Lajayer, B. A., & Ghorbanpour, M. (2019). The potential of biotechnology for mitigation of greenhouse gasses effects: solutions, challenges, and future perspectives. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(174). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4339-7>
- FAO. (2021). Enhancing Early Warning Systems in Agriculture: Scaling up the Response to Climate Change. *Food and Agriculture Organization*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/125b023c-002f-4387-9150-dc7fbbd86cbc/content>
- FAO. (2023). *Public-private partnerships boost capacity and know-how in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>
- Filippi, P., Jones, E. J., Wimalathunge, N. S., et al. (2019). An approach to forecast grain crop yield using multi-layered, multi-farm data sets and machine learning. *Precision Agriculture*, 20(5), 1015–1029. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-09628-4>
- Geetha, P., & Karthikeyan, R. (2021). *Embracing IoT and Precision Agriculture for Sustainable Crop Yields*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51195-0_8
- Guamán-Rivera, S. A., & Flores-Mancheno, C. I. (2023). Seguridad Alimentaria y Producción Agrícola Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 2(1), 1-20. <https://doi.org/10.69484/rcz/v2/n1/35>
- Herrera-Feijoo, R. J. (2024). Principales amenazas e iniciativas de conservación de la biodiversidad en Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 33–56. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/85>
- Ibarra-Navarrete, Y. S., & Pinargote-Mendoza, E. R. (2023). Ácido oxálico, alternativa orgánica para el control de varroasis (*Varroa destructor*) en abejas (*Apis mellifera*). Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.63>
- Macías-Véliz, J. N., & Chicharro-López, F. I. (2023). *Procesos de producción de tilapias (*Oreochromis niloticus*) con aplicación informática*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.64>
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>
- Mishra, A. K., Chaudhari, S. K., Kumar, P., Singh, R., Rai, P., & Sharma, D. K. (2020). Carbon sequestration and soil carbon build-up under Eucalyptus plantation in

- semi-arid regions of North-West India. *Journal of Sustainable Forestry*, 39(1), 1-15. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1749856>
- Nevavuori, P., Narra, N., & Lipping, T. (2020). Crop yield prediction using multitemporal UAV data and spatio-temporal deep learning models. *Remote Sensing*, 12(23), 4000. <https://doi.org/10.3390/rs12234000>
- Piñeiro, V., Arias, J., Elverdin, P., Ibáñez, A. M., Morales Opazo, C., Prager, S., & Torero, M. (2021). Achieving sustainable agricultural practices: From incentives to adoption and outcomes. *Nature Sustainability*. https://books.google.es/books?id=5tsaEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- PLOS ONE. (2023). Vulnerability of the agricultural sector to climate change: The development of a pan-tropical Climate Risk Vulnerability Assessment. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213641>
- Rani, J. V. (2021). *Precision Agriculture: Unmanned Aerial Vehicles and IoT-Powered Smart Irrigation System for Plant Health Monitoring*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1724-8_56
- Rezk, N. G., El-Din Hemdan, E., AttiaA-F E-S, & El-Rashidy, M. A. (2021). An efficient IoT based smart farming system using ML algorithms. *Multimedia Tools and Applications*, 80(1), 773–797. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09740-6>
- Rojas, F. E., & Saavedra-Mera, K. A. . (2022). Diversificación de Cultivos y su Impacto Económico en las Fincas Ecuatorianas. *Revista Científica Zambos*, 1(1), 51-68. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n1/21>
- Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture: the soil is the base. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404>
- Vargas-Fonseca, A. D., Borja-Cuadros, O. M., & Cristiano-Mendivelso, J. F. (2023b). Introducción a la estructura ecológica principal del Distrito Capital y su región ambiental: Conceptos fundamentales, ordenamiento territorial e instrumentos jurídicos. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.34>
- Vincent, P. M. D., & Elavarasan, D. (2020). Crop yield prediction using deep reinforcement learning model for sustainable agrarian applications. *IEEE Access*, 8, 86886–86901. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992480>
- Viteri-Robayo, C. P., Mallitasig-Endara, F. V. ., Tapia-Barahona, S. A., Robayo-Zurita, V. A., Lozada-Tobar, L. A., Cruz-Hidalgo, P. A., Camacho-Aldaz, M. P., Hidalgo-Morales, K. P., Fiallos-Altamirano, F. F., Ortiz-Gavilanes, J. I., Gutiérrez-Lozada, A. E., Cabrera-Beltran, L. J., Iza-Iza, S. P., Arteaga-Almeida, C. A., Bustillos-Ortiz, A. A., Bustillos-Ortiz, D. I. ., Pomboza-Tamaquiza, P. P., Ulcuango-Ulcuango, K. del C., Moreno-Mejía, C. R., Guanga-Lara, V. E., & Galarza-Esparza, W. B. (2023) *Antropología Alimentaria*. Editorial Grupo AEA. <https://doi.org/10.55813/egaea.l.2022.39>
- World Bank. (2023). *Public-private partnerships and the 2030 Agenda for Sustainable Development*. World Bank Blogs. <https://www.worldbank.org>

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.