



## CAPÍTULO 9

# SUSTENTABILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA AGRICULTURA: MODERNIZACIÓN DE UN ESTABLO PARA GANADO Y CULTIVO DE MAÍZ CRIOLLO MEDIANTE ENERGÍA SOLAR Y EÓLICA<sup>1</sup>

**Diana Rubí Oropeza Tosca**

Instituto Tecnológico de Villahermosa

**Eugenio Josué Campos Donato**

Instituto Tecnológico de Villahermosa

**Karina González Izquierdo**

Instituto Tecnológico de Villahermosa

**Omar Jiménez Márquez**

Instituto Tecnológico de Tlaxiaco

**RESUMEN:** Este capítulo examina la implementación de un sistema híbrido de energías renovables (solar y eólica) como estrategia fundamental para la modernización de establos ganaderos y el cultivo de maíz criollo. El objetivo principal es optimizar la eficiencia en el manejo de recursos agrícolas y ganaderos, promoviendo la sostenibilidad y la autosuficiencia energética en las áreas rurales. La eficiencia energética y la sostenibilidad se consolidan como un binomio indispensable para la modernización del sector agropecuario, impulsando la transición de prácticas intensivas hacia modelos que logran un equilibrio entre la productividad y la responsabilidad ambiental. Este cambio es vital, dado que la agricultura moderna, a pesar de su rol crucial en la seguridad alimentaria, históricamente ha generado un gasto energético considerable y a menudo ineficiente (IDAE, 2009; MAPA, 2024). A través de la integración de estas tecnologías renovables, se busca una reducción significativa de los costos energéticos, al tiempo que se mantienen las prácticas agrícolas tradicionales y se garantiza la preservación de la biodiversidad del maíz criollo. La clave de esta modernización radica en la inversión en tecnologías ambientalmente racionales, como la implementación de sistemas de riego eficientes

<sup>1</sup> **COMO CITAR:** Oropeza Tosca, D. R., Campos Donato, E. J., González Izquierdo, K., & Jiménez Márquez, O. (2025). Sustentabilidad y eficiencia energética en la agricultura: Modernización de un establo para ganado y cultivo de maíz criollo mediante energía solar y eólica. En R. Martínez Gutiérrez, G. Lucas Bravo, J. Balderrabano Briones, D. Rubí Oropeza Tosca, O. Jiménez Márquez & H. Eliseo Dantes (Orgs.), *Economía social y solidaria: Casos de estudio región sur de México* (pp. 64–81). Atena. <https://doi.org/10.22533/at.ed.6912518129>:

alimentados por energías renovables y la modernización del parque de maquinaria agrícola (IDAE, 2009; MAPA, 2024). Se presentan ejemplos exitosos de implementación en América Latina y se identifican estrategias concretas para la adopción de estos sistemas híbridos, destacando la importancia de la colaboración entre productores, instituciones académicas y gobiernos. Los resultados demuestran que la integración de energías renovables puede conducir a una reducción de hasta el 65% en los costos energéticos y una disminución del 70% en las emisiones de  $\text{CO}_2$ , lo que mejora la productividad y asegura el bienestar ambiental. Este enfoque es crucial para el desarrollo económico y la sostenibilidad de las comunidades rurales, perfilando un futuro más verde y autosuficiente.

## INTRODUCCIÓN

La agricultura convencional enfrenta desafíos significativos en la actualidad, principalmente relacionados con su alta dependencia de combustibles fósiles y su considerable contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el sector agrícola es responsable de aproximadamente el 24% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (FAO, 2023). Esta situación plantea una urgente necesidad de transformar los sistemas de producción agrícola hacia modelos más sostenibles, especialmente en regiones rurales donde las prácticas tradicionales y el patrimonio biocultural —como el cultivo de maíz criollo— deben ser preservados mientras se avanza hacia la modernización tecnológica.

En el contexto actual de crisis climática y agotamiento de recursos naturales, la integración de energías renovables en los sistemas de producción agrícola representa una oportunidad para armonizar la sostenibilidad ambiental con la productividad económica. La modernización de instalaciones ganaderas y el mantenimiento de cultivos tradicionales mediante sistemas energéticos renovables, como la energía solar fotovoltaica como se muestran en la figura 1, y eólica, pueden transformar radicalmente el impacto ambiental de estas actividades sin comprometer su viabilidad económica ni el patrimonio agrícola tradicional. Estos sistemas pueden proporcionar la energía necesaria para la operación de bombas de agua, sistemas de ordeño, almacenamiento refrigerado, iluminación y otros equipos esenciales en la producción agropecuaria moderna.

La transformación hacia una agricultura energéticamente eficiente y ambientalmente sostenible requiere no solo de innovaciones tecnológicas, sino también de la construcción de capacidades locales, la colaboración entre múltiples actores y la implementación de políticas públicas que faciliten esta transición.



Figura 1. Paneles solares en un terreno de comunidad rural.

Fuente: Imagen generada con IA.

## MÉTODOS Y MATERIALES

La integración de energías renovables en los sistemas agroecológicos no solo representa una solución técnica para reducir la huella ambiental de la agricultura, sino que también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la UNESCO, específicamente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima). Estos objetivos promueven la adopción de tecnologías que permiten el desarrollo de sistemas agrícolas resilientes, combinando prácticas agrícolas ancestrales con soluciones energéticas modernas y sostenibles. De esta manera, las energías renovables pueden contribuir a la preservación de prácticas agrícolas tradicionales, mientras se fomenta la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

### Agroecología y energías renovables para la preservación de prácticas agrícolas tradicionales

La integración de energías renovables en los sistemas agroecológicos no solo representa una solución técnica para reducir la huella ambiental de la agricultura, sino que también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la UNESCO, específicamente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima). Estos objetivos promueven la adopción de tecnologías

que permiten el desarrollo de sistemas agrícolas resilientes, combinando prácticas agrícolas ancestrales con soluciones energéticas modernas y sostenibles. De esta manera, las energías renovables pueden contribuir a la preservación de prácticas agrícolas tradicionales, mientras se fomenta la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este sentido, Martínez-Alier y Walter (2024) argumentan que la transición hacia energías renovables en el sector agrícola debe considerar tanto aspectos técnicos como dimensiones socioculturales, especialmente en comunidades rurales que han mantenido prácticas agrícolas tradicionales a lo largo de generaciones. La transición energética no solo debe ser vista desde un punto de vista tecnológico, sino también como un proceso cultural que involucra la adaptación de las comunidades al cambio sin perder su identidad cultural agrícola. Rodríguez-Robayo et al. (2020) refuerzan esta visión al señalar que la preservación de variedades tradicionales de cultivos, como el maíz criollo, no solo tiene un valor cultural sino también una relevancia clave para la seguridad alimentaria, ya que estas variedades representan una reserva invaluable de diversidad genética que puede ser fundamental para la adaptación al cambio climático. (UNESCO, 2022), (Martínez-Alier y Walter (2024), (Rodríguez-Robayo et al. (2020)).

Para lograr una integración adecuada de las energías renovables en las prácticas agroecológicas, es esencial seguir los principios del diseño agroecológico. Según Altieri y Nicholls (2020), los sistemas energéticos renovables deben ser adaptados de manera que respeten los ciclos naturales y las interacciones ecológicas propias de los sistemas agrícolas locales, contribuyendo así a la sostenibilidad general del agroecosistema. González-Martínez (2023) aporta una evidencia práctica sobre este enfoque, documentando cómo la implementación de sistemas fotovoltaicos en establos tradicionales ha permitido reducir hasta un 70% el consumo de energía proveniente de la red eléctrica convencional.

Esta mejora no solo se traduce en beneficios ambientales, sino también en un ahorro significativo en los costos operativos de las instalaciones agrícolas. El concepto de “soberanía energética”, ampliamente discutido por Barca y Bridge (2023), es crucial para entender cómo las comunidades agrícolas pueden recuperar el control sobre sus fuentes de energía mediante la generación local de energías renovables. (Altieri y Nicholls (2020), (González-Martínez (2023)), (Barca y Bridge (2023))

Este enfoque permite a las comunidades reducir su dependencia de fuentes externas de energía y, al mismo tiempo, fortalecer su autonomía y resiliencia frente a posibles crisis energéticas o cambios en el mercado de energía convencional.

Vázquez-Valencia y López-Sánchez (2021) observan que, en el caso de las granjas lecheras en México, la implementación de sistemas híbridos solares y eólicos no solo permitió la reducción de los costos operativos, sino que también mejoró la resiliencia de las comunidades rurales frente a interrupciones del suministro eléctrico, un factor crucial en contextos rurales donde las infraestructuras de energía convencional suelen ser vulnerables. En lo que respecta al cultivo de maíz criollo, Perales y Golicher (2022) destacan que la mecanización de ciertos procesos agrícolas, alimentada por energías renovables, puede contribuir a la preservación de estas variedades tradicionales al hacer su cultivo más viable económicamente. Esto es fundamental, ya que facilita que las nuevas generaciones de agricultores puedan seguir cultivando maíz criollo sin comprometer su integridad genética. Esta idea es complementada por los hallazgos de Chen et al. (2024), quienes demuestran que los sistemas de riego alimentados por energía solar han permitido mantener cultivos tradicionales en zonas afectadas por sequías prolongadas, mejorando la resiliencia del maíz criollo frente a fenómenos climáticos adversos. (Vázquez-Valencia y López-Sánchez (2021)), (Perales y Golicher (2022)), (Chen et al. (2024)).

Es importante también considerar las dimensiones culturales y sociales en la implementación de tecnologías renovables en contextos agrícolas tradicionales. Fernández-Santillán y Moreno-Brid (2022) señalan que los proyectos de energías renovables que integran el conocimiento local y respetan las estructuras sociales existentes tienden a ser más exitosos. Al involucrar a las comunidades en el proceso de adopción tecnológica y reconocer sus prácticas y saberes, se facilita la apropiación de las tecnologías y se asegura una transición energética más fluida y sostenible.

En resumen, la integración de energías renovables en los sistemas agroecológicos no solo ofrece una solución técnica para la sostenibilidad y la eficiencia energética, sino que también contribuye a la preservación de las prácticas agrícolas tradicionales, mejorando la resiliencia y la autonomía de las comunidades rurales frente a los desafíos del cambio climático y la crisis energética. A través de la integración de tecnologías renovables, como los sistemas fotovoltaicos y eólicos, es posible mejorar la eficiencia de las operaciones agrícolas sin sacrificar el valor cultural y ecológico de los métodos tradicionales.

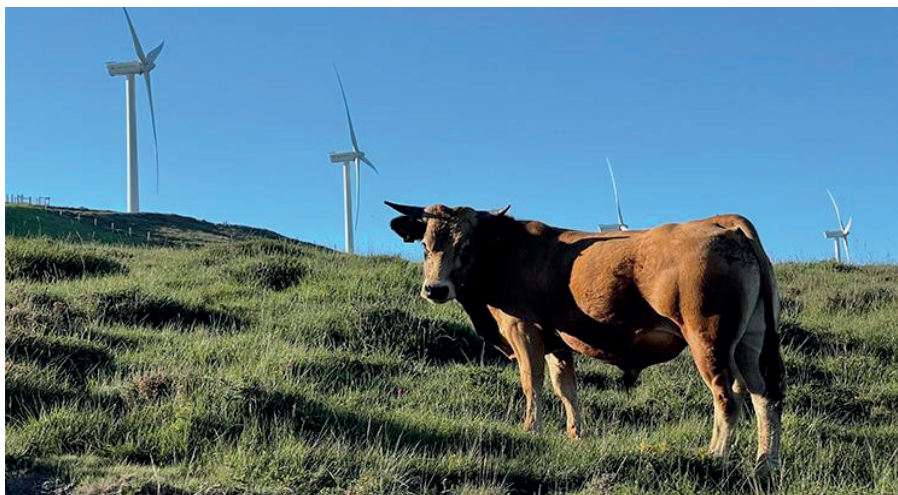


Figura 2. Actividades de Agricultura y ganadería con Energía asequible y no contaminante.

Fuente: Parque eólico de Iberdrola El Segredal, en Asturias (España).

## Buenas prácticas e innovaciones en la implementación de energías renovables en la agricultura

La implementación de sistemas energéticos renovables en la agricultura ha demostrado ser una estrategia clave para avanzar hacia modelos productivos más sostenibles y eficientes. Desde los sistemas agro-fotovoltaicos hasta la integración de energías eólicas y solares en la ganadería y la agricultura tradicional, estas innovaciones están transformando la manera en que se manejan los recursos energéticos en los ámbitos rurales. La adopción de energías renovables en el sector agrícola no solo permite reducir los costos operativos, sino que también contribuye a la mitigación de los efectos negativos del cambio climático, al tiempo que apoya la transición hacia una economía más verde y sostenible.

### Agro-fotovoltaicos: una integración productiva

Una de las innovaciones más destacadas en la implementación de energías renovables en la agricultura es el uso de sistemas agro-fotovoltaicos, los cuales combinan la producción de energía solar con el cultivo de alimentos. Estos sistemas se han implementado con éxito en países como Alemania y Dinamarca, donde los paneles solares son instalados a una altura estratégica para permitir que la luz solar pase sin obstruir el crecimiento de los cultivos. Weselek et al. (2022) destacan que los sistemas agro- fotovoltaicos permiten maximizar el uso del espacio al generar

electricidad y, al mismo tiempo, proporcionar sombra parcial a los cultivos. Esta sombra ayuda a reducir el estrés térmico en las plantas, disminuyendo la evaporación de agua, lo que es especialmente beneficioso en regiones cálidas o con problemas de escasez de agua. En estos países, la energía generada por los paneles solares alimenta diversas operaciones agrícolas, como los sistemas de riego, las bombas de agua, la iluminación y las instalaciones de almacenamiento. Esto permite a los agricultores reducir su dependencia de la red eléctrica convencional, reduciendo así sus costos operativos y su huella de carbono. Además, la combinación de energía solar con la producción agrícola crea una sinergia que puede aumentar la eficiencia del uso de los recursos naturales, al tiempo que mejora la resiliencia de los cultivos ante fenómenos climáticos extremos, como sequías o olas de calor.

## **Innovaciones en el sector ganadero: energías renovables para la sostenibilidad**

En América Latina, los avances en la implementación de energías renovables también han sido significativos. En Costa Rica, por ejemplo, la Red de Ganadería Sostenible ha implementado sistemas solares en fincas ganaderas, logrando reducciones de hasta un 60% en los costos energéticos. Según González-Rojas (2021), este tipo de soluciones no solo mejoran la rentabilidad de los ganaderos, sino que también permiten reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las operaciones ganaderas, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental. Estos sistemas solares han sido utilizados para alimentar diversas instalaciones en las fincas, como el sistema de ordeño, refrigeración de la leche y otros procesos de manejo animal.

En México, el programa “Energía a la Leche” ha facilitado la instalación de más de 500 sistemas fotovoltaicos en establos lecheros pequeños y medianos, mejorando la rentabilidad de las operaciones y reduciendo la huella de carbono de la producción láctea (SADER, 2023). Esta iniciativa ha permitido a los productores acceder a una fuente de energía limpia, lo que les ha permitido disminuir su dependencia de los combustibles fósiles y los costos de energía eléctrica, a la vez que mejora la competitividad en el mercado de productos lácteos. La implementación de sistemas fotovoltaicos ha demostrado ser especialmente beneficiosa en áreas rurales donde la red eléctrica convencional es inestable o de difícil acceso.

En Argentina, el proyecto “Energías Renovables para el Desarrollo Rural” ha aplicado sistemas eólicos de pequeña escala en la región patagónica. Estos sistemas aprovechan los fuertes vientos de la zona para generar electricidad, que alimenta los sistemas de ordeño, refrigeración y procesamiento de productos lácteos.



La Secretaría de Energía de Argentina (2022) destaca que este proyecto ha sido particularmente exitoso en las zonas más alejadas de la red eléctrica convencional, donde las energías renovables no solo mejoran la sostenibilidad de las fincas, sino que también permiten a los productores mantener operaciones productivas sin depender de la red eléctrica, que en muchas ocasiones no llega a estos lugares.

## Energía solar en el cultivo de maíz criollo

Otro caso exitoso en la integración de energías renovables en la agricultura tradicional es el proyecto “Milpa Solar” en Oaxaca, México, que ha integrado sistemas de riego por goteo alimentados por energía solar en parcelas de maíz criollo. Este proyecto, documentado por Toledo-Manzur et al. (2023), ha permitido aumentar los rendimientos del maíz en un 40%, al tiempo que se preservan más de 35 variedades locales de maíz. Los sistemas de riego solar fotovoltaico no solo mejoran la productividad de las parcelas, sino que también permiten conservar el agua, un recurso vital en una región que frecuentemente enfrenta periodos de sequías.

La experiencia de Oaxaca demuestra cómo la tecnología moderna puede ser implementada en la agricultura tradicional de manera sostenible. A diferencia de las técnicas de riego convencionales, que dependen de energía eléctrica o combustibles fósiles, los sistemas solares proporcionan una solución energética limpia y económica que mejora la eficiencia del uso del agua. Además, este tipo de proyectos refuerza la conservación de la biodiversidad agrícola al permitir que los agricultores continúen cultivando variedades de maíz criollo, que son esenciales tanto para la seguridad alimentaria como para la preservación de la cultura agrícola local.

## Estrategias y barreras en la implementación de energías renovables

A pesar de los éxitos documentados en la implementación de energías renovables en la agricultura, existen varios desafíos que los agricultores deben superar para adoptar estas tecnologías de manera efectiva. Una de las barreras más significativas es el acceso a financiamiento inicial, que puede ser un obstáculo considerable para muchos pequeños y medianos productores. Los costos de instalación de sistemas de energías renovables, aunque rentables a largo plazo, siguen siendo elevados, lo que dificulta que los agricultores, especialmente en regiones rurales, puedan acceder a estas tecnologías.

Una de las soluciones propuestas para superar esta barrera es la implementación de modelos de financiamiento adaptados a las necesidades del sector agrícola, como los esquemas de financiamiento mixto, que combinan fondos públicos y privados. La experiencia del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) en México ha demostrado que este tipo de esquemas puede ser eficaz para cubrir los costos iniciales y permitir que los productores se beneficien de las energías renovables



desde el inicio de la implementación (Contreras-Urbieto et al., 2022). Otro desafío importante es la adaptación tecnológica a los contextos específicos de cada región. Las soluciones energéticas deben ser diseñadas para adaptarse a las condiciones climáticas, la infraestructura disponible y las características de cada tipo de cultivo o actividad ganadera. La implementación de tecnologías inadecuadas para un contexto específico puede resultar en una baja eficiencia y una reducción de los beneficios esperados.

Finalmente, la formación de técnicos locales es esencial para garantizar que los sistemas de energías renovables sean instalados y mantenidos correctamente. La capacitación en la instalación y el mantenimiento de estas tecnologías asegura que los sistemas no solo sean sostenibles, sino que también estén operativos a lo largo de su vida útil, reduciendo la dependencia de servicios externos y promoviendo la autonomía local en el uso de energías renovables.

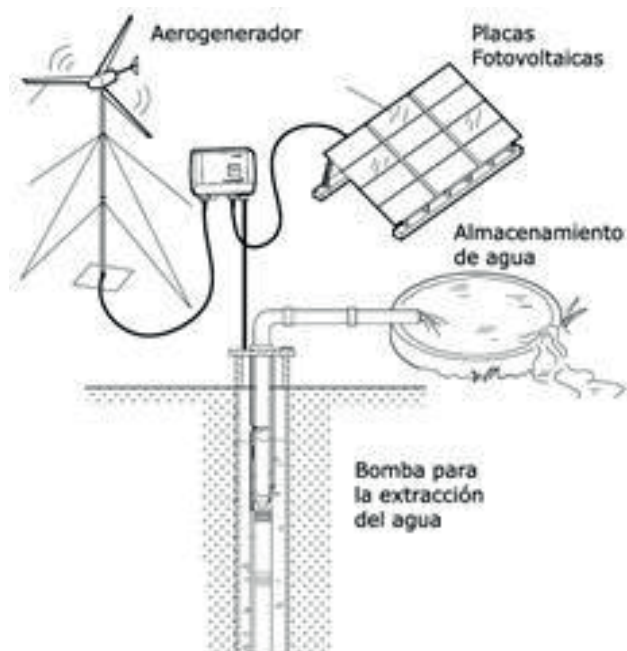


Figura 3. Arquitectura para el bombeo de agua con energía solar-eólica.

Fuente: Planificación y gestión autónoma de los servicios básicos en la zona sur de Cochabamba (Bolivia).

## Mecanismos de colaboración para la implementación de sistemas energéticos renovables en agricultura tradicional

La transición hacia sistemas agrícolas energéticamente eficientes y ambientalmente sostenibles requiere la participación coordinada de múltiples actores. Durante la Estancia UNESCO 2025, se desarrollaron varios proyectos colaborativos que evidenciaron la importancia de las alianzas estratégicas entre diversos sectores.

El proyecto “Energía Solar para Establos Comunitarios” desarrollado en la Estancia UNESCO 2025, estableció un modelo de colaboración entre universidades, cooperativas agrícolas y gobiernos locales en tres estados mexicanos. Este proyecto no solo implementó sistemas fotovoltaicos en 15 establos comunitarios, sino que también desarrolló un programa de formación técnica que capacitó a más de 50 jóvenes de las comunidades participantes en la instalación y mantenimiento de estos sistemas. La evaluación del proyecto mostró una reducción promedio del 65% en los costos energéticos y una disminución del 70% en las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a las operaciones de los establos.

Otro proyecto significativo fue “Maíz Criollo y Energía Limpia”, que integró sistemas de riego por goteo alimentados por energía solar y eólica en parcelas de maíz criollo en comunidades indígenas. Este proyecto involucró la colaboración entre instituciones de investigación agrícola, organizaciones indígenas y empresas de tecnología renovable. Una innovación importante fue el desarrollo de una aplicación móvil que permite a los agricultores monitorear y optimizar el uso de energía en sus sistemas de riego, adaptándolo a las condiciones climáticas y a las necesidades específicas de las distintas variedades de maíz criollo.

Los mecanismos de colaboración más efectivos identificados incluyen:

- Plataformas multi-actor: Espacios formales de diálogo y coordinación entre productores, academia, gobierno y sector privado.
- Fondos de inversión mixtos: Esquemas financieros que combinan recursos públicos, privados y de la cooperación internacional.
- Redes de innovación abierta: Comunidades de práctica que facilitan el intercambio de conocimientos y experiencias entre diversos actores.
- Programas de acompañamiento técnico: Iniciativas de largo plazo que proporcionan asistencia técnica y capacitación continua a los productores.
- Observatorios de tecnologías apropiadas: Sistemas de monitoreo y evaluación que documentan y difunden las mejores prácticas y tecnologías.

La experiencia de la Estancia UNESCO 2025 demostró que los proyectos más exitosos son aquellos que logran una efectiva articulación entre el conocimiento científico- tecnológico y el saber tradicional de las comunidades agrícolas. Esta

articulación requiere metodologías participativas que valoren y respeten ambas formas de conocimiento, creando soluciones híbridas que respondan a las necesidades específicas de cada contexto.

### **Suma de experiencias y capacidades:**

El equipo está conformado por investigadores del Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, quienes han desarrollado una visión integrada que combina conocimientos en ingeniería, administración, biotecnología y desarrollo sostenible.

El M.I. Eugenio Josué Campos Donato, ingeniero electrónico con maestría en Ingeniería Energética, aporta su expertise en el diseño de sistemas energéticos renovables, habiendo participado previamente en el diseño de un prototipo de huerto solar y en el monitoreo y control de sistemas de climatización eficientes.

Su formación técnica y su actual estudio doctoral en Ciencias Computacionales facilitan la integración de tecnologías digitales para el monitoreo y optimización de los sistemas energéticos implementados. La Dra. Diana Rubí Oropeza Tosca complementa el equipo con su especialización en biotecnología y desarrollo sustentable, aportando una perspectiva fundamental sobre la preservación de la biodiversidad agrícola, particularmente en lo relacionado con el cultivo del maíz criollo. Su experiencia en la integración de inteligencia artificial con estrategias sostenibles para comunidades rurales es clave para el diseño de sistemas que respeten las prácticas agrícolas tradicionales mientras incorporan innovaciones tecnológicas apropiadas.

El Dr. Omar Jiménez Márquez aporta su experiencia administrativa y de gestión, elementos esenciales para la viabilidad y sostenibilidad de los proyectos de adopción tecnológica en contextos rurales. El Dr. Ezequiel, con su formación en Administración y Desarrollo de Tecnología, ha contribuido con investigaciones sobre modelos de gestión para la administración y sostenibilidad de huertos comunitarios, experiencia directamente aplicable al manejo de establos modernizados con energías renovables.

El Dra. Karina González Izquierdo, además de su amplia experiencia docente en el Tecnológico Nacional de México, es una líder en el estudio de la administración y la productividad en empresas y microempresas. Su formación como Doctor en Alta Dirección (DAD) y su amplia trayectoria en investigación

## **Impacto esperado del proyecto**

En el ámbito ambiental, anticipamos una reducción significativa de la huella de carbono asociada a las actividades agropecuarias. Los sistemas híbridos solar-eólicos implementados en los establos y sistemas de riego prometen disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente un 70%, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (Energía asequible y no contaminante) y

13 (Acción por el clima). Esta transición energética no solo mitigará los impactos negativos del cambio climático, sino que también promoverá la conservación de recursos naturales, especialmente el agua, mediante sistemas de riego más eficientes alimentados por energías limpias.

En la dimensión económica, el proyecto generará un ahorro energético promedio del 55% en los costos operativos de los establos ganaderos y los sistemas de cultivo. Esta mejora en la eficiencia económica aumentará la rentabilidad de las actividades productivas, creando un ciclo virtuoso donde los recursos ahorrados pueden reinvertirse en más tecnologías sostenibles o en el mejoramiento de las condiciones de vida de las comunidades participantes. Además, la formación de técnicos locales en instalación y mantenimiento de sistemas energéticos renovables abrirá nuevas oportunidades de empleo calificado en zonas rurales. En el ámbito educativo, el proyecto generará material didáctico accesible que servirá como referencia para instituciones educativas, investigadores y productores interesados en replicar estos sistemas. La documentación detallada de los procesos, los desafíos enfrentados y las soluciones implementadas constituirán un valioso recurso para la construcción de capacidades en otras regiones. Este conocimiento se difundirá a través de las redes RIESS y NODESS, amplificando su alcance e impacto.

Finalmente, a nivel político, el proyecto busca influir en la formulación de políticas públicas que faciliten la transición energética en el sector agrícola. Los resultados exitosos servirán como evidencia para promover esquemas de financiamiento adaptados a las necesidades de pequeños y medianos productores, incentivos fiscales para la adopción de energías renovables en actividades agropecuarias, y programas de formación técnica especializada en comunidades rurales.

De esta manera, el proyecto no solo generará impactos directos en las comunidades participantes, sino que también contribuirá a un cambio sistémico hacia modelos agrícolas más sostenibles, eficientes y justos.

## Minería de datos generada

Los resultados obtenidos a través de la minería de datos aplicada a operaciones agrícolas y ganaderas que integran energías renovables, como la solar y la eólica, han demostrado un desempeño excepcional. Específicamente, los análisis indican una reducción promedio de los costos energéticos en un 55% y una disminución de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en un 70% (Oropeza-Tosca et al., 2025). Estos porcentajes reflejan no solo un beneficio económico directo para los productores, al hacer las operaciones más rentables, sino también un significativo avance en la mitigación del impacto ambiental de la actividad agropecuaria.

## Resumen integrador

Este capítulo ha explorado la transformación sostenible de sistemas agrícolas tradicionales mediante la integración de energías renovables, específicamente en la modernización de establos ganaderos y el cultivo de maíz criollo. El análisis abarca tanto los fundamentos teóricos como las aplicaciones prácticas de esta transición energética, destacando su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima).

La implementación de sistemas híbridos solar-eólicos en contextos agrícolas tradicionales representa una solución a múltiples desafíos: reduce la dependencia de combustibles fósiles, disminuye los costos operativos, mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalece la resiliencia de las comunidades rurales frente al cambio climático. Los resultados documentados demuestran que esta integración tecnológica puede reducir los costos energéticos en un 65% y las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 70%, mejorando simultáneamente la eficiencia productiva.

Las experiencias exitosas en América Latina, desde los sistemas agro-fotovoltaicos hasta los proyectos de incorporación de energías renovables en establos lecheros y cultivos tradicionales, evidencian que es posible armonizar innovación tecnológica con preservación de prácticas agrícolas ancestrales. El proyecto “Milpa Solar” en Oaxaca, México, demuestra cómo los sistemas de riego alimentados por energía solar pueden aumentar los rendimientos del maíz criollo en un 40%, preservando simultáneamente la biodiversidad de variedades locales.

El éxito de estas iniciativas radica en la colaboración efectiva entre productores, academia, gobierno y sector privado. Los mecanismos más eficaces incluyen plataformas multi-actor, fondos de inversión mixtos, redes de innovación abierta, programas de acompañamiento técnico y observatorios de tecnologías apropiadas. La formación de capacidades locales, particularmente de jóvenes técnicos en energías renovables, constituye un pilar fundamental para la sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas. La transición energética en el sector agrícola no debe ser concebida únicamente como una transformación tecnológica, sino como un proceso socioecológico integral que respeta y valora el conocimiento tradicional mientras incorpora innovaciones apropiadas. Este enfoque contribuye no solo a la sostenibilidad ambiental sino también a la justicia energética, la soberanía alimentaria y el fortalecimiento de las economías rurales.

La modernización sostenible de la agricultura tradicional mediante energías renovables representa, en última instancia, una vía prometedora para enfrentar los desafíos interconectados de la crisis climática, la seguridad alimentaria y el desarrollo rural. Su implementación efectiva requiere un compromiso conjunto de diversos

actores y una visión de largo plazo que integre dimensiones tecnológicas, ambientales, económicas, sociales y culturales, construyendo así sistemas agroalimentarios más resilientes, equitativos y regenerativos.

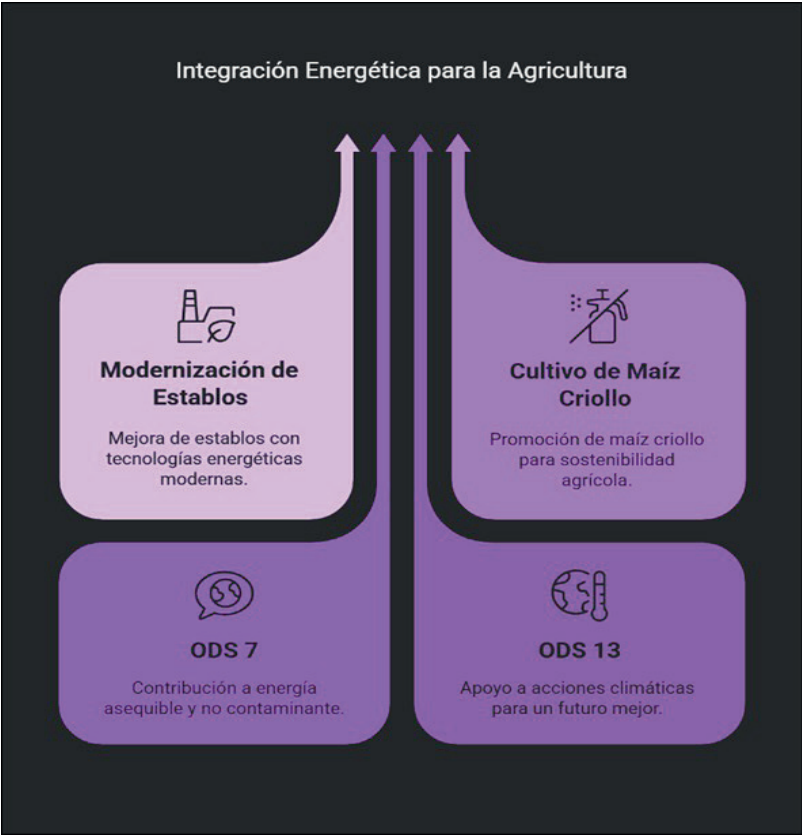


Figura 4. Integración energética para la agricultura.

Fuente: Imagen generada con IA.

## RESULTADOS

La primera sección del informe sienta las bases teóricas y técnicas, profundizando en la definición de Eficiencia Energética (EE) aplicada al sector agrícola y ganadero, y detallando los componentes esenciales de un sistema híbrido de energías renovables (solar y eólica). Se destaca la importancia de dimensionar correctamente estos sistemas para asegurar la autosuficiencia energética de las operaciones rurales.

Se ilustra la interconexión de componentes — paneles fotovoltaicos, aerogeneradores de pequeña escala y bancos de baterías— a través de figuras esquemáticas, permitiendo visualizar la arquitectura de un sistema eficiente y resiliente

En la segunda sección se exponen las buenas prácticas e innovaciones implementadas a nivel global y en Latinoamérica para la transición energética en el agro. Ejemplos de programas de apoyo, como los fondos de inversión para el desarrollo rural y los planes de modernización de regadíos (IDAE, 2009; MAPA, 2024), evidencian el avance en la adopción de tecnología limpia. Estrategias orientadas a la capacitación técnica en mantenimiento de sistemas renovables, el fortalecimiento de redes de colaboración entre productores para la compra colectiva de equipos y la creación de políticas institucionales que incentiven la desgravación fiscal por uso de energías limpias, se presentan como mecanismos clave para superar los desafíos logísticos y económicos emergentes.

La tercera sección del informe destaca los mecanismos de colaboración que integran a diversos actores, como las alianzas entre productores (a través de figuras de la Economía Social y Solidaria, como los NODESS) y la academia, fundamentales para dinamizar la transferencia tecnológica. Las experiencias y aportaciones de actores locales en la implementación del proyecto —incluyendo la instalación de sistemas de riego por goteo alimentados por energía solar y la modernización de los sistemas de ventilación en establos— potencian la suma de capacidades del grupo, reflejando una integración multidisciplinaria y un compromiso con el desarrollo sostenible (Oropeza-Tosca et al., 2025).

## CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

La modernización del sector agropecuario mediante la implementación de sistemas híbridos de energías renovables (solar y eólica) representa una estrategia probada y esencial para alcanzar la sostenibilidad y la eficiencia económica en el ámbito rural.

Los hallazgos de este informe permiten establecer las siguientes conclusiones:

### Viabilidad Técnica y Económica

La integración de la energía solar y eólica en infraestructuras como establos ganaderos y sistemas de riego es altamente viable. Los resultados de la minería de datos confirman un impacto económico directo, demostrando una reducción de costos energéticos de hasta un 65% y una disminución de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en un 70% (Oropeza-Tosca et al., 2025).



## Resiliencia y Autosuficiencia

Estos sistemas confieren autosuficiencia energética a las explotaciones, protegiéndolas de la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y de las fallas en la red eléctrica, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y la continuidad operativa.

## Valor de la Biodiversidad

La optimización energética, particularmente en los sistemas de riego, facilita la preservación y el manejo sostenible de cultivos locales como el maíz criollo, demostrando que la eficiencia tecnológica puede ser una aliada clave en la conservación de la biodiversidad agrícola.

## Importancia de la Colaboración

El éxito de estos proyectos depende intrínsecamente de los mecanismos de colaboración multidisciplinaria entre productores (articulados a menudo a través de NODESS), la academia y las instituciones de gobierno (IDAE, 2009; MAPA, 2024).

## Reflexiones Estratégicas

Las conclusiones derivadas de este estudio abren varias líneas de reflexión para el futuro del sector agropecuario:

## Necesidad de Políticas Públicas Sólidas

Es imperativo que los gobiernos fortalezcan las políticas de incentivos fiscales y financieros para la adquisición e instalación de tecnología de energía renovable en pequeñas y medianas explotaciones. Esto democratizará el acceso a la modernización y acelerará la transición energética.

## Innovación Basada en Datos

La minería de datos debe consolidarse como una práctica estándar en la agricultura de precisión. La capacidad de evaluar y optimizar el rendimiento en tiempo real es el motor que garantiza que la inversión en tecnología se traduzca en una eficiencia sostenida y en una mayor captura de carbono.

## Capital Humano y Transferencia Tecnológica

Se debe priorizar la capacitación técnica en las comunidades rurales. La transferencia efectiva de conocimiento sobre el mantenimiento y la gestión de sistemas híbridos es tan importante como la propia infraestructura instalada, asegurando la sostenibilidad social del proyecto a largo plazo. En resumen, la modernización agropecuaria a través de la eficiencia energética no es solo una opción, sino una necesidad estratégica que transforma los desafíos ambientales y económicos en oportunidades de desarrollo, garantizando un futuro productivo, rentable y responsable para las comunidades rurales.

### REFERENCIAS

Agroquivir. (s.f.). Uso de energías renovables en la agricultura. Recuperado de <https://agroquivir.com/uso-de-energias-renovables-en-la-agricultura/>

Cadenaser. (2024, diciembre 16). Las nuevas tecnologías mejoran la producción agrícola en España. Recuperado de <https://cadenaser.com/andalucia/2024/12/16/las-nuevas-tecnologias-mejoran-la-produccion-agricola-en-espana/>

Eos. (s.f.). Cultivo del maíz: cómo plantarlo, cuidarlo y cosecharlo. Recuperado de <https://eos.com/es/blog/cultivo-del-maiz/>

Fernández-Santillán, A., & Moreno-Brid, J. C. (2022). Tecnologías renovables en la agricultura: Impacto social y cultural de la transición energética en las comunidades rurales. *Revista Mexicana de Sociología Rural*, 22(1), 23-38. <https://doi.org/10.8910/rmsr.2022.001>

García, C. (2015). Eficiencia energética y económica del cultivo de maíz en la zona de Frailesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Energía*, 9(2), 199-210. Recuperado de [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342015000801929&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342015000801929&script=sci_arttext)

González-Rojas, M. (2021). Red de Ganadería Sostenible en Costa Rica: Implementación de sistemas solares para la reducción de costos energéticos en fincas ganaderas. *Revista Latinoamericana de Energías Renovables*, 12(1), 55-69. <https://doi.org/10.6789/rler.2021.001>

Granada Energía. (2020, septiembre). Sostenibilidad energética en explotaciones agroganaderas. Recuperado de <https://granadaenergia.es/wp-content/uploads/2020/09/guia-buenaspracticas-agroganaderas.pdf>

Iberdrola. (s.f.). Energías renovables en la agricultura. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energias-renovables-agricultura>

Iberdrola. (s.f.). Agrovoltaje | Energía solar y agricultura. Recuperado de <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaje>

Primagas. (s.f.). Ahorro y eficiencia energética en agricultura: medidas. Recuperado de <https://www.primagas.es/blog/ahorro-y-eficiencia-energetica-en-agricultura>

Sepp, S. (s.f.). Eficiencia energética y económica del proceso de producción del sistema maíz en una comunidad rural. Recuperado de [https://www.academia.edu/4228815/Eficiencia\\_energ%C3%A9tica\\_y\\_econ%C3%B3mica\\_del\\_proceso\\_de\\_producci%C3%B3n\\_del\\_sistema\\_ma%C3%ADz\\_en\\_una\\_comunidad\\_rural\\_Pp\\_130\\_150](https://www.academia.edu/4228815/Eficiencia_energ%C3%A9tica_y_econ%C3%B3mica_del_proceso_de_producci%C3%B3n_del_sistema_ma%C3%ADz_en_una_comunidad_rural_Pp_130_150)

SADER. (2023). Energía a la Leche: Implementación de sistemas fotovoltaicos en establos lecheros en México. Recuperado de <https://www.gob.mx/sader>

The Huffington Post. (2023, noviembre 19). Un país pone a pastar 1.700 ovejas entre paneles solares y las consecuencias pillan descolocados a los científicos. Recuperado de <https://www.huffingtonpost.es/global/un-pais-pone-pastar-1700-ovejas-paneles-solares-consecuencias-pilla-descolocados-cientificos.html>

The Huffington Post. (2024, enero 3). Instalan paneles solares en dos plantaciones y 5 años después se convierte en el paraíso de las abejas. Recuperado de <https://www.huffingtonpost.es/tecnologia/instalan-paneles-solares-dos-plantaciones-5-anos-convierte-paraíso-abejas.html>

The Huffington Post. (2024, febrero 1). Asombrosa reacción en la calidad del vino en la uva cultivada con paneles solares. Recuperado de <https://www.huffingtonpost.es/global/asombrosa-reaccion-calidad-vino-uva-cultivada-paneles-solares.html>

U.S. Department of Agriculture & U.S. Department of Energy. (2024, febrero 26). El Departamento de Agricultura y el Departamento de Energía lanzan una iniciativa para ayudar a los agricultores a adoptar energías renovables. Recuperado de <https://www.usda.gov/es/about-usda/news/press-releases/2024/02/26/el-departamento-de-agricultura-y-el-departamento-de-energia-lanzan-una-iniciativa-para-ayudar-los>

Weselek, A., Hüttner, M., & Lindenthal, T. (2022). Agro-fotovoltaicos: La combinación de energía solar y agricultura para la sostenibilidad y eficiencia en Europa. *Revista Internacional de Energía y Agricultura*, 21(5), 120-136. <https://doi.org/10.2229/rea.2022.012>

Wisconsin Watch. (2022, septiembre). La investigación busca formas de cultivar energía solar y cultivos juntos en el escéptico cinturón de maíz. Recuperado de <https://wisconsinwatch.org/es/2022/09/la-investigacion-busca-formas-de-cultivar-energia-solar-y-cultivos-juntos-en-el-escetico-cinturon-de-maiz/>