



Integración de tecnologías de monitoreo para la optimización del riego en microparcels agrícolas en la Sierra Nororiental de Puebla.

Integration of monitoring technologies for the optimization of irrigation in agricultural microplots in the Northeastern Sierra of Puebla.

AUTORES:

Israel Ildefonso García¹, Luisa Angélica Viñas Meza², Patricia Ochoa Trujillo³, Alma Delia Hernández Vargas⁴

¹Tecnológico Nacional De México, Instituto Tecnológico Superior De Teziutlán, israel.ig@teziutlan.tecnm.mx

²Tecnológico Nacional De México, Instituto Tecnológico Superior De Teziutlán, luisa.vm@teziutlan.tecnm.mx

³Tecnológico Nacional De México, Instituto Tecnológico Superior De Teziutlán, patricia.ot@teziutlan.tecnm.mx

⁴Tecnológico Nacional De México, Instituto Tecnológico Superior De Teziutlán, alma.hv@teziutlan.tecnm.mx

Resumen.

El monocultivo de papa en la Sierra Nororiental de Puebla ha generado un uso intensivo de agroquímicos y un consumo excesivo de agua, afectando la calidad del suelo y contaminando los mantos acuíferos de la región. Las microparcels de hortalizas representan una alternativa viable para diversificar la producción y reducir el impacto ambiental, pero su manejo tradicional carece de información suficiente sobre las condiciones del suelo, el clima y las necesidades hídricas de los cultivos. Este estudio tuvo como objetivo diseñar e implementar un sistema de monitoreo y riego controlado para microparcels agrícolas en el municipio de Tlatlauquitepec, Puebla, que permita optimizar el uso del agua, registrar variables ambientales y apoyar la toma de decisiones de los agricultores a través de herramientas tecnológicas. Se instaló un sistema de riego por goteo con sensores de humedad del suelo, temperatura y radiación, integrado a una plataforma digital de monitoreo y a un modelo de inteligencia artificial para la identificación de patrones y la generación de alertas tempranas. Los resultados mostraron una reducción significativa en el consumo de agua, una mejora en la uniformidad del riego y una mayor capacidad de respuesta por parte de los agricultores ante condiciones climáticas adversas o riesgos de estrés hídrico. La percepción de los productores sobre la utilidad del sistema fue positiva, destacando la facilidad de uso de la plataforma y la utilidad de las alertas generadas. Se concluye que la integración de tecnologías de monitoreo y riego controlado en microparcels puede contribuir a una agricultura más sustentable en la región, reduciendo el impacto ambiental y mejorando la productividad de los cultivos de hortalizas.

Palabras clave: Agricultura De Precisión, Microparcels, Riego Por Goteo, Sensores De Humedad, Inteligencia Artificial, Sierra Nororiental De Puebla.

Abstract

The potato monoculture in the Sierra Nororiental of Puebla has generated intensive use of agrochemicals and excessive water consumption, affecting soil quality and contaminating the region's aquifers. Vegetable microplots represent a viable alternative to diversify production and reduce environmental impact, but their traditional management lacks sufficient information on soil conditions, climate, and crop water needs. This study aimed to design and implement a monitoring and controlled irrigation system for agricultural microplots in the municipality of Tlatlauquitepec, Puebla, to optimize water use, record environmental variables, and support farmers' decision-making through technological tools. A drip irrigation system with soil moisture, temperature, and radiation sensors was installed, integrated into a digital monitoring platform and an artificial intelligence model for pattern recognition and early warning generation. The results showed a significant reduction in water consumption, improved irrigation uniformity, and greater responsiveness by farmers to adverse weather conditions or risks of water stress. Farmers' perception of the system's usefulness was positive, highlighting the ease of use of the platform and the usefulness of the generated alerts. It is concluded that the integration of monitoring and controlled irrigation technologies in microplots can contribute to more sustainable agriculture in the region, reducing environmental impact and improving the productivity of vegetable crops.

Keywords: Precision Agriculture, Microplots, Drip Irrigation, Moisture Sensors, Artificial Intelligence, Sierra Nororiental De Puebla.

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en México no es solo una actividad económica: es el sostén de millones de familias, especialmente en las zonas rurales del país. Pero en las últimas décadas, ese sostén se ha ido debilitando. El modelo de agricultura intensiva, basado en el monocultivo y el uso masivo de agroquímicos, ha generado efectos que ya no se pueden ignorar: suelos degradados, mantos acuíferos contaminados y una pérdida acelerada de biodiversidad [1][4][8]. El campo mexicano produce más, pero a un costo que empieza a ser insostenible.

En la Sierra Nororiental de Puebla, esa transformación ha sido particularmente profunda. La región, con su ecosistema de bosque de niebla, alta humedad y suelos fértiles, fue durante décadas un espacio de agricultura diversificada: ciruela, manzana, pera, durazno, aguacate, chile, maíz, haba, ajo y cebolla convivían en un mismo territorio [1][8]. Pero ese equilibrio se rompió. Hoy, el cultivo de papa bajo la modalidad de monocultivo ha desplazado a casi todos los demás productos, convirtiéndose en la actividad agrícola dominante [1][12]. En municipios como Tlatlauquitepec, Chignautla y Hueytamalco, la superficie destinada a otros cultivos se ha reducido drásticamente, y con ella, la diversidad agrícola que caracterizaba a la región [1][4].

El problema no es solo la pérdida de variedad. Es también el impacto ambiental que el monocultivo de papa ha generado. Este cultivo, cuando se desarrolla en zonas que no presentan las condiciones naturales adecuadas — como ocurre en el bosque de niebla —, requiere un uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas [1][5]. Y esos químicos no desaparecen. Se filtran en el suelo, llegan a los mantos acuíferos y contaminan los manantiales y ríos que abastecen a las comunidades cercanas [1][4][5]. En una región donde el agua aún es abundante, pero no infinita, el riesgo de contaminación es una amenaza que crece con cada ciclo de cultivo.

El uso de agua en los cultivos tradicionales también es problemático. La papa y el maíz, los dos cultivos predominantes en la región, consumen volúmenes excesivos de agua [1][6]. Y cuando el riego no se controla, el desperdicio es mayor. La combinación de un consumo elevado y una gestión deficiente del recurso genera una presión innecesaria sobre los ecosistemas acuáticos [1][4]. Los efectos no son solo ambientales. También afectan la salud de las personas que viven en las comunidades cercanas a las zonas de cultivo, expuestas a residuos químicos que terminan en el agua que beben o en los alimentos que consumen [1][4][5].

Frente a este panorama, las microparcels de hortalizas aparecen como una alternativa viable. Se trata de pequeñas extensiones de terreno destinadas a la producción agrícola que permiten mantener un mayor control sobre el cultivo, facilitan el uso de maquinaria de manejo sencillo y reducen el consumo de agua [1][9]. En municipios como Tlatlauquitepec, Teziutlán, Chignautla, Atempan y Teteles, se cultivan hortalizas como ajo, calabaza, jitomate, rábano, zanahoria, acelga, lechuga, cilantro y chile en este tipo de parcelas [1][4]. La producción en microparcels, al desarrollarse en superficies menores que los monocultivos, permite un manejo más cercano del suelo, del agua y del desarrollo de las plantas [1][9]. Y cuando no se utilizan agroquímicos, los productos pueden considerarse orgánicos, lo que les abre un espacio diferenciado en el mercado [1][9].

Pero el manejo tradicional de estas parcelas también tiene limitaciones. Los productores cuentan con conocimiento empírico valioso, pero no siempre tienen acceso a información suficiente sobre las condiciones del suelo, el clima o las necesidades hídricas de los cultivos [1][4][5]. La ausencia de infraestructura como invernaderos expone los cultivos a fenómenos naturales, y la observación directa, aunque útil, no siempre es suficiente para anticipar problemas [1][9].



La tecnología puede ayudar a cerrar esa brecha. El riego por goteo es una solución probada que permite suministrar agua de forma controlada, reducir el desperdicio y aplicar el recurso solo donde es necesario [1][6]. Los sensores de humedad del suelo, temperatura y radiación proporcionan información que el agricultor no puede obtener por observación directa, y esa información, cuando se analiza adecuadamente, puede traducirse en alertas tempranas sobre riesgos como déficit de agua, heladas o exceso de radiación [1][7]. La inteligencia artificial, por su parte, permite reconocer patrones en el comportamiento del cultivo y del entorno, y generar predicciones que apoyan la toma de decisiones [1][10]. Finalmente, una plataforma digital de monitoreo, accesible desde dispositivos móviles, concentra la información y facilita su consulta en cualquier momento y lugar, incluso en zonas con conectividad limitada [1][11][13].

La pregunta que guía esta investigación es clara: ¿puede un sistema de monitoreo y riego controlado optimizar el uso del agua y mejorar la producción en microparcelas agrícolas? La evidencia disponible sugiere que sí, pero la respuesta no es automática. Depende de cómo se diseñe el sistema, de cómo se adapte a las condiciones locales y de cómo lo reciban los agricultores [1][11][13]. Y ahí está el desafío: no basta con instalar tecnología. Hay que lograr que los productores la entiendan, la acepten y la integren a su trabajo cotidiano.

La justificación de este estudio descansa en esa necesidad. La región necesita alternativas que reduzcan el impacto ambiental, que mejoren la toma de decisiones de los agricultores y que contribuyan a la sustentabilidad y a la seguridad alimentaria. La tecnología no es la única respuesta, pero puede ser parte de ella. Este proyecto busca integrar conocimientos de ingeniería, producción agrícola y sustentabilidad para atender una problemática real del contexto regional, y sentar las bases para futuras investigaciones orientadas al uso responsable de los recursos naturales y al desarrollo de sistemas productivos más eficientes.

El objetivo general es implementar un sistema de monitoreo y gestión para microparcelas agrícolas en el municipio de Tlatlauquitepec, orientado a optimizar el uso del agua y apoyar la toma de decisiones del productor. Los objetivos específicos incluyen la instalación de un sistema de riego por goteo, el uso de sensores para medir humedad del suelo, temperatura y radiación, el análisis de los datos obtenidos para generar alertas tempranas, la integración de herramientas de inteligencia artificial para el reconocimiento de patrones, el desarrollo de una plataforma digital de monitoreo accesible desde dispositivos móviles, y la evaluación del impacto del sistema en términos de ahorro de agua y mejora del manejo del cultivo.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Agricultura y sustentabilidad

La presión sobre los recursos naturales no es un fenómeno reciente, pero su intensidad actual no tiene precedentes. El modelo económico dominante, basado en la explotación intensiva de los recursos, ha generado pérdida de biodiversidad, erosión de suelos y contaminación por agroquímicos en una escala que pone en riesgo la viabilidad de los sistemas productivos a mediano plazo [14]. La agricultura, que debería ser una actividad de conservación y regeneración, se ha convertido en una de las principales fuentes de degradación ambiental. El monocultivo, en particular, reduce la materia orgánica del suelo, disminuye su capacidad de retención de agua y acelera la erosión [15]. Los suelos, que tardan miles de años en formarse, se degradan en décadas cuando no se manejan adecuadamente [16].

La producción de alimentos está directamente afectada por el cambio climático. Eventos extremos como sequías, inundaciones y heladas se han vuelto más frecuentes e intensos, impactando los rendimientos agrícolas y la estabilidad de los sistemas productivos [17]. Paradójicamente, la agricultura intensiva también contribuye al cambio climático: las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de fertilizantes, la maquinaria agrícola y el cambio de uso de suelo son significativas [18]. La ganadería intensiva, vinculada al modelo de monocultivo, genera emisiones de metano y óxido nitroso que agravan el calentamiento global [17]. La producción de alimentos no puede seguir desligada de su impacto ambiental.

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) reconocen esta interdependencia. El ODS 2, "Hambre cero", no se limita a la producción de alimentos, sino que incluye la sostenibilidad de los sistemas de producción y la resiliencia frente al cambio climático [19]. La agroecología, entendida como una disciplina científica que integra principios ecológicos en el diseño de sistemas agrícolas, ha sido identificada como una respuesta clave para guiar la transformación de los sistemas alimentarios [20]. Esta aproximación reduce la dependencia de insumos externos, optimiza el uso de recursos locales y contribuye a la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos [21]. En el contexto de la Sierra Nororiental, la agroecología ofrece una vía para superar el monocultivo de papa y recuperar la diversidad agrícola que caracterizaba a la región [15].

2.2. Riego por goteo y eficiencia hídrica



El riego por goteo se ha consolidado como uno de los métodos más eficientes para el suministro de agua en la agricultura [22]. Su principio es sencillo pero efectivo: el agua se aplica directamente en la zona radicular de las plantas, gota a gota, a través de emisores o goteros [22]. Esta aplicación localizada reduce drásticamente las pérdidas por evaporación y escorrentía, que son comunes en sistemas de riego por aspersión o inundación [22]. La eficiencia del riego por goteo puede alcanzar hasta el 95%, lo que significa que casi toda el agua aplicada es aprovechada por el cultivo [22].

Los beneficios en el ahorro de agua son significativos. Diversos estudios han documentado reducciones en el consumo de agua de entre el 30% y el 70% en comparación con los métodos de riego tradicionales [23]. En cultivos como maíz, trigo y arroz, el riego por goteo ha demostrado ahorros de hasta el 50% en comparación con el riego por inundación [24]. Esta eficiencia se traduce no solo en un menor uso del recurso hídrico, sino también en una reducción de los costos de bombeo y energía asociados [24]. Para regiones donde el agua es escasa o los costos de energía son altos, esta ventaja es determinante.

La aplicación en microparcels presenta ventajas adicionales. El riego por goteo es especialmente adecuado para pequeñas extensiones de terreno, ya que permite un control preciso sobre la cantidad de agua que recibe cada planta [25]. Esto es particularmente útil en cultivos de hortalizas, donde las necesidades hídricas pueden variar significativamente entre especies [25]. Además, los sistemas de riego por goteo para pequeñas parcelas son relativamente sencillos de instalar y operar, y pueden diseñarse con materiales de bajo costo [23]. La posibilidad de automatizar el riego mediante temporizadores o sensores de humedad del suelo añade otra capa de eficiencia, permitiendo que el sistema se adapte a las condiciones cambiantes del cultivo y del clima [22].

2.3. Sensores y monitoreo agrícola

El monitoreo agrícola ha experimentado una transformación notable en los últimos años. Lo que antes dependía casi exclusivamente de la observación directa y la experiencia del agricultor, ahora se complementa con dispositivos capaces de medir variables que el ojo humano no percibe [26]. Los sensores de humedad del suelo, por ejemplo, permiten conocer con precisión la cantidad de agua disponible para las plantas, información que resulta fundamental para evitar tanto el estrés hídrico como el encharcamiento [27]. La humedad del suelo controla procesos como el crecimiento de raíces, la respiración microbiana y las tasas de ciclado biogeoquímico, lo que la convierte en una variable central para la gestión del cultivo [27]. Conocer esta variable tiene un impacto directo en la gestión del agua y en la salud de las plantas, ya que estas pueden presentar estrés tanto por déficit de agua, asociado a sequías, como por exceso de riego cuando no se cuenta con una medición adecuada [27].

Los sensores de temperatura y radiación completan el cuadro. La temperatura del suelo influye en la actividad microbiana y en la disponibilidad de nutrientes, mientras que la radiación fotosintéticamente activa (PAR) mide la cantidad de luz disponible para la fotosíntesis [28]. Estos datos, cuando se combinan, ofrecen una imagen completa de las condiciones en las que se desarrolla el cultivo [28]. La tecnología actual ha avanzado hasta el punto de desarrollar sensores portátiles que se adhieren a las hojas como tatuajes, capaces de medir el déficit de presión de vapor y el crecimiento del tallo sin necesidad de baterías externas [29]. Este tipo de innovaciones, aunque todavía en fase de desarrollo, apuntan hacia un futuro donde el monitoreo será más accesible y menos invasivo [29].

El funcionamiento de estos sensores en el campo es relativamente sencillo. Los sensores de humedad del suelo, por ejemplo, utilizan osciladores de capacitancia que detectan cambios en la constante dieléctrica del suelo, la cual varía con el contenido de agua [30]. Los sensores de temperatura, por su parte, emplean termistores o detectores de temperatura de resistencia que convierten los cambios de temperatura en señales eléctricas medibles [28]. La información generada por estos dispositivos se transmite a un microcontrolador, que la procesa y la envía a una plataforma digital para su análisis y visualización [31].

La generación de alertas es quizás el aspecto más valioso del monitoreo agrícola. Los sistemas basados en inteligencia artificial pueden analizar los datos en tiempo real y detectar patrones que indican un riesgo inminente: un descenso brusco de la humedad del suelo, un aumento de temperatura que podría causar estrés térmico, o una combinación de variables que sugiere la aparición de una plaga [32]. Estas alertas permiten al agricultor tomar decisiones informadas antes de que el daño sea irreversible [33]. Un sistema inteligente basado en el análisis de datos permite transformar la información recolectada en elementos comprensibles para el agricultor, facilitando la interpretación de variables que no siempre pueden percibirse de manera empírica [33]. Este tipo de sistemas apoya la detección de tendencias relacionadas con el comportamiento del cultivo y del entorno, considerando variables ambientales que, aunque no estaban previstas inicialmente por los productores, forman parte del proceso productivo y pueden influir en los resultados obtenidos [33].

2.4. Inteligencia artificial en la agricultura

La inteligencia artificial ha pasado de ser una promesa lejana a una herramienta con aplicaciones concretas en el campo. No se trata de reemplazar el criterio del agricultor, sino de ofrecerle información que, de otra forma, no tendría [34]. Los sistemas basados en machine learning pueden procesar cantidades de datos que serían imposibles de analizar manualmente: imágenes satelitales, registros climáticos, historiales de cultivo y lecturas de sensores en tiempo real [34]. A partir de esa información, los modelos identifican patrones que el ojo humano no detecta y generan recomendaciones específicas para cada parcela [34].

El reconocimiento de patrones es una de las aplicaciones más extendidas. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden distinguir entre un cultivo sano y uno estresado, detectar los primeros síntomas de una enfermedad antes de que sea visible a simple vista o identificar zonas del campo que requieren atención inmediata [35]. La evidencia muestra que los modelos basados en redes neuronales convolucionales (CNN) alcanzan precisiones superiores al 91% en la detección temprana de enfermedades y plagas, lo que permite una intervención oportuna [35]. Los modelos híbridos que combinan CNN con redes de memoria a largo plazo (LSTM) logran incluso mejores resultados, superando el 94% de precisión y reduciendo las falsas alarmas a menos del 6% [35].

La predicción de riesgos es quizás el aporte más valioso de la inteligencia artificial en el ámbito agrícola. Los modelos pueden anticipar sequías, heladas o brotes de plagas con varios días o incluso semanas de antelación [36]. Un estudio reciente demostró que los modelos basados en LSTM pueden predecir la humedad del suelo para los próximos siete días con un error reducido (RMSE de 0.043), lo que permite planificar el riego de manera más precisa [35]. Esta capacidad predictiva, cuando se combina con datos meteorológicos y de sensores, permite reducir el consumo de agua hasta en un 27% en comparación con los métodos tradicionales [35].

El apoyo a la decisión del agricultor es el paso final. La inteligencia artificial no se limita a generar datos; los traduce en recomendaciones comprensibles y accionables [34]. Los sistemas pueden sugerir el momento óptimo para sembrar, la cantidad de agua que necesita el cultivo en cada etapa o la dosis adecuada de fertilizante [37]. Los agricultores que han adoptado este tipo de herramientas reportan mejoras significativas: reducciones en el uso de insumos, aumentos en los rendimientos y una mayor capacidad para anticiparse a eventos climáticos adversos [38]. La tecnología no sustituye el conocimiento empírico del agricultor; lo complementa y lo potencia [38].

2.5. Plataformas digitales y agricultura inteligente

El Internet de las Cosas (IoT) ha dejado de ser una promesa tecnológica para convertirse en una realidad con aplicaciones concretas en el campo. Los sistemas basados en IoT integran sensores, microcontroladores y plataformas digitales en un ecosistema que permite monitorear y controlar las condiciones del cultivo de manera remota y en tiempo real [39]. Los sensores instalados en el campo miden variables como la humedad del suelo, la temperatura, la radiación solar y la humedad ambiental, y transmiten esos datos a través de redes inalámbricas a una plataforma en la nube [40]. Desde allí, la información puede ser consultada por el agricultor a través de una aplicación móvil o una interfaz web, sin necesidad de desplazarse hasta la parcela [39]. Esta capacidad de acceso remoto transforma la manera en que los agricultores gestionan sus cultivos, liberándolos de la necesidad de estar físicamente presentes para tomar decisiones informadas [40].

El desarrollo de interfaces amigables es un aspecto central de estas plataformas. Los agricultores no necesitan ser expertos en tecnología para utilizar estos sistemas [39]. Las aplicaciones móviles están diseñadas con interfaces intuitivas que presentan la información de manera clara y visual: gráficos de colores, mapas de la parcela, indicadores de estado y alertas que se activan cuando alguna variable supera los umbrales establecidos [39]. Los sistemas más avanzados integran inteligencia artificial para analizar los datos recolectados y ofrecer recomendaciones específicas en el idioma del agricultor, lo que reduce la barrera de entrada para usuarios con poca familiaridad tecnológica [41].

El acceso desde dispositivos móviles es quizás la característica más transformadora de estas plataformas. Un agricultor puede consultar el estado de su cultivo desde cualquier lugar y en cualquier momento, utilizando únicamente su teléfono inteligente [42]. Esto es especialmente valioso en regiones donde las parcelas están distantes o donde el agricultor tiene que desplazarse con frecuencia. La posibilidad de recibir alertas en tiempo real —sobre descensos bruscos de humedad, riesgos de helada o temperaturas extremas— permite actuar antes de que el daño sea irreversible [42]. La evidencia muestra que el monitoreo basado en IoT puede aumentar la productividad de los cultivos hasta en un 19% y mejorar la calidad de los frutos en comparación con las prácticas tradicionales [43]. Un estudio documentó que el uso de sistemas de monitoreo en línea para el cultivo de tomate permitió una reducción del consumo de agua entre el 30% y el 50%, al tiempo que incrementaba el rendimiento en un 10% a 15% [40]. Estas cifras no son anecdóticas: reflejan un cambio real en la forma de producir alimentos.



2.6. Monocultivo vs. diversidad agrícola

El monocultivo se ha convertido en la práctica dominante en muchas regiones agrícolas del mundo, incluida la Sierra Nororiental de Puebla. Pero sus efectos no son neutrales. La evidencia muestra que la agricultura intensiva basada en el monocultivo reduce la materia orgánica del suelo, disminuye la biodiversidad y aumenta la dependencia de insumos externos como fertilizantes y plaguicidas [44]. Un estudio reciente que analizó 2,655 fincas en 11 países encontró que la simplificación agrícola —especialmente en forma de monocultivos intensivos— representa un riesgo significativo para mantener los sistemas productivos dentro de los límites planetarios seguros [44]. Los suelos se degradan, los nutrientes se agotan y la capacidad de recuperación del ecosistema disminuye con cada ciclo de cultivo.

Los beneficios de la diversidad de cultivos son múltiples y están bien documentados. La diversificación agrícola mejora la salud del suelo, aumenta el contenido de carbono orgánico, incrementa la riqueza microbiana y reduce la densidad aparente del suelo [45]. Los sistemas diversificados, como los cultivos intercalados o las rotaciones que incluyen leguminosas, optimizan el uso de los recursos y reducen el riesgo de fracaso ante eventos climáticos extremos [46]. En términos económicos, la diversificación también tiene ventajas. El análisis de costo-beneficio de sistemas diversificados en Europa mostró que, cuando se consideran los beneficios ambientales y socioculturales, los márgenes brutos mejoran en la mayoría de los escenarios evaluados, y los beneficios a mediano y largo plazo son incluso mayores [47]. La diversidad no es solo una cuestión ecológica; es también una estrategia económica que genera resiliencia.

Las microparcels representan un modelo alternativo que encaja con los principios de la diversificación agrícola. Estas pequeñas extensiones de terreno permiten a los agricultores mantener un control más cercano sobre el cultivo, experimentar con diferentes especies y aplicar prácticas de manejo adaptadas a las condiciones específicas de cada parcela [48]. En la Sierra Nororiental, las microparcels dedicadas a hortalizas como ajo, calabaza, jitomate, zanahoria y lechuga ofrecen una vía para recuperar la diversidad agrícola que el monocultivo de papa ha erosionado [49]. A diferencia de los monocultivos extensivos, las microparcels facilitan la rotación de cultivos, reducen la dependencia de agroquímicos y permiten una producción más cercana al autoconsumo familiar [48]. La combinación de diversidad de cultivos y prácticas de conservación del suelo puede aumentar la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas [45]. La diversificación no es una opción marginal; es una necesidad para construir sistemas agrícolas más resilientes y sustentables.

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo aplicada y tecnológica. No busca generar teoría nueva sobre la agricultura o los sistemas de riego, sino probar si una solución tecnológica concreta funciona en condiciones reales y con agricultores reales. La pregunta no es "qué es el riego por goteo", sino "cómo podemos hacer que el riego por goteo y el monitoreo funcionen en las microparcels de la Sierra Nororiental". Por eso el componente práctico es central. El enfoque es mixto: lo cuantitativo permite medir el ahorro de agua, la frecuencia de riego y la productividad; lo cualitativo permite entender cómo los agricultores perciben el sistema, qué dificultades enfrentan y qué cambios introducen en su forma de trabajar.

3.2. Ubicación del estudio

El proyecto se desarrolla en dos contextos complementarios. La primera fase, correspondiente a las pruebas y validación inicial del sistema, se realiza en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán. El Instituto cuenta con espacios disponibles —áreas verdes y zonas que actualmente no se aprovechan de manera sistemática— que permiten realizar ensayos controlados antes de llevar el sistema al campo. Esta fase es necesaria para ajustar la configuración de los sensores, probar la comunicación entre los dispositivos y la plataforma digital, y capacitar al equipo técnico en el manejo del sistema.

La fase de implementación completa se lleva a cabo directamente con agricultores de la comunidad de Ilita, perteneciente al municipio de Tlatlauquitepec, Puebla. Allí se instala el sistema en microparcels de hortalizas con la participación activa de los productores. La elección de Ilita no es casual: los agricultores de esta comunidad manifestaron su interés en participar y cuentan con experiencia en el cultivo de hortalizas, lo que facilita la interacción entre el conocimiento empírico de los productores y las herramientas tecnológicas que el proyecto propone.

3.3. Participantes y vinculación



La vinculación del proyecto se establece de manera directa con la comunidad de Iilita, particularmente con el comité local de dicha comunidad. Los agricultores locales, que utilizan sus terrenos para el cultivo de diversas hortalizas en microparcels, forman parte activa del proceso productivo y mostraron disposición para participar en el desarrollo e implementación del sistema. Esta relación es fundamental, porque permite que el proyecto se desarrolle en condiciones reales y que el sistema sea evaluado por quienes realmente lo van a usar.

La vinculación no se limita a los agricultores. El proyecto también se articula con el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, que actúa como intermediario institucional y proporciona la infraestructura necesaria para las pruebas iniciales. Aunque el planteamiento del proyecto no establece una vinculación directa con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, los productores de la comunidad mantienen vínculos previos con esta dependencia, lo que forma parte del contexto en el que se desarrolla la actividad agrícola.

Además, existe una vinculación con proveedores de materiales para la instalación de los sistemas de riego y monitoreo. Esta relación se realiza a través del Instituto, que administra la adquisición de los insumos requeridos, fortaleciendo su papel como enlace entre los productores y los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto.

La vinculación del proyecto se orienta también hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, particularmente en lo relacionado con la reducción del impacto ambiental y la atención al cambio climático. Al desarrollarse desde una institución educativa, el proyecto incorpora un componente académico que busca concientizar a los productores sobre la importancia del cuidado de los recursos naturales y la adopción de prácticas más sustentables.

3.4. Diseño del sistema

El sistema de monitoreo y riego controlado se diseña para operar en microparcels de hortalizas. No se trata de un sistema genérico que se instala igual en cualquier lugar. El diseño considera el tamaño reducido de las parcelas, los tipos de cultivo y las condiciones particulares de la Sierra Nororiental. Cada componente tiene una función específica y todos están integrados para que el sistema funcione como un conjunto.

El riego por goteo es el primer componente. Consiste en una red de tuberías principales y secundarias que distribuyen el agua desde la fuente hasta las plantas. Los emisores o goteros se colocan junto a cada planta, liberando el agua de forma lenta y controlada. El sistema de control permite programar horarios de riego, ajustar la cantidad de agua según la etapa del cultivo y, en su versión más avanzada, activar el riego de manera automática en función de las lecturas de los sensores de humedad del suelo. La instalación es relativamente sencilla y los materiales están disponibles en la región, aunque la configuración requiere un conocimiento técnico que los agricultores no siempre tienen.

Los sensores son el segundo componente. Se colocan tres tipos de sensores en cada microparcela. Los sensores de humedad del suelo se entierran a diferentes profundidades para medir la cantidad de agua disponible para las plantas. Los sensores de temperatura registran las variaciones térmicas del suelo y del ambiente. Los sensores de radiación miden la cantidad de luz solar que llega al cultivo, información útil para entender el crecimiento de las plantas y anticipar situaciones de estrés.

Los microcontroladores son el cerebro del sistema. Son dispositivos pequeños que reciben la información de los sensores, la procesan y la envían a un servidor a través de una conexión inalámbrica. La elección de los microcontroladores no es arbitraria: deben ser compatibles con los sensores, consumir poca energía y funcionar en condiciones de campo, donde la conectividad puede ser limitada y las temperaturas varían.

La plataforma digital es el componente que el agricultor ve y usa. Es una interfaz accesible desde una computadora o un teléfono móvil que muestra la información generada por el sistema: gráficos de humedad, tendencias de temperatura, alertas de riego y recomendaciones. La plataforma está diseñada para ser simple, porque el usuario no tiene por qué ser un experto en tecnología. Los datos se presentan de manera visual, con colores que indican el estado del cultivo y mensajes claros que orientan la toma de decisiones.

La inteligencia artificial es el último componente, pero no el menos importante. No es un añadido, sino el mecanismo que permite que el sistema aprenda y mejore con el tiempo. Los modelos de inteligencia artificial se entrenan con los datos recolectados durante los primeros ciclos de cultivo, identificando patrones en el comportamiento del suelo y de las plantas. Con el tiempo, el sistema puede predecir cuándo el cultivo va a necesitar agua, anticipar riesgos de heladas o detectar condiciones que podrían favorecer la aparición de plagas. La inteligencia artificial no reemplaza al agricultor, pero le da información que de otra manera no tendría.

3.5. Variables de estudio



El estudio considera dos tipos de variables. La variable independiente es el sistema de monitoreo y riego controlado. Es decir, la presencia o ausencia del sistema instalado en la microparcela. No se trata de probar diferentes sistemas, sino de comparar el comportamiento del cultivo y el uso del agua antes y después de la instalación del sistema.

Las variables dependientes son cuatro. El consumo de agua es la principal: se mide en litros por ciclo de cultivo y se compara con el consumo estimado en cultivos similares sin sistema de riego controlado. La frecuencia de riego se registra para conocer cuántas veces se activa el sistema y en qué momentos. El crecimiento de hortalizas se evalúa mediante mediciones periódicas de altura, número de hojas y diámetro del tallo. La productividad se mide al final del ciclo, en términos de peso y calidad de los frutos cosechados. La comparación entre ambas condiciones permite establecer si el sistema produce cambios en el comportamiento del cultivo y en el uso del agua.

3.6. Instrumentos y equipos

Para que el sistema funcione se necesita una combinación de hardware y software. No es un solo dispositivo, sino un conjunto de elementos que trabajan de manera coordinada.

Los sensores son el punto de partida. Se utilizan sensores de humedad del suelo, que miden la cantidad de agua disponible en la tierra. También sensores de temperatura, que registran las variaciones térmicas del ambiente y del suelo. Y sensores de radiación, que miden la intensidad de la luz solar que llega a las plantas. Cada uno de estos sensores proporciona información que el agricultor no puede obtener por sí mismo.

Los microcontroladores son los encargados de recibir esa información y enviarla al sistema. Se utilizan dispositivos como Arduino, ESP32 y Raspberry Pi. La elección de uno u otro depende de la complejidad de la instalación y de la cantidad de sensores que se conecten. El ESP32, por ejemplo, tiene conectividad WiFi integrada, lo que facilita la transmisión de datos a la plataforma digital sin necesidad de módulos adicionales. La Raspberry Pi se usa cuando se necesita más capacidad de procesamiento, especialmente para tareas de inteligencia artificial.

El cableado estructurado y la fibra óptica son necesarios para conectar los componentes del sistema. No todo es inalámbrico. Los sensores y microcontroladores necesitan energía y, en algunos casos, conexiones físicas para transmitir los datos de manera confiable. En el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán se dispone de herramientas especializadas para el manejo de cableado estructurado, incluyendo ponchadoras, cortadoras de fibra óptica, fusionadoras y medidores de potencia óptica. Estas herramientas permiten realizar conexiones robustas que funcionen en condiciones de campo.

El software es el componente que da sentido a los datos. Se desarrolla una plataforma digital que recibe, almacena y visualiza la información generada por los sensores. El software incluye un módulo de análisis de datos que procesa la información y genera alertas cuando alguna variable supera los umbrales establecidos. También se utilizan herramientas de inteligencia artificial para entrenar modelos que reconozcan patrones en el comportamiento del cultivo y del entorno.

3.7. Procedimiento

El desarrollo del proyecto se organiza en cinco fases secuenciales. No se puede saltar ninguna, porque cada una depende de la anterior.

La Fase 1 es la instalación y pruebas en el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán. Aquí se monta el sistema completo en un entorno controlado: se colocan los sensores, se instala el riego por goteo, se configuran los microcontroladores y se prueba la comunicación con la plataforma digital. Esta fase permite identificar problemas antes de llevar el sistema al campo. Es más fácil ajustar un sensor en el laboratorio que en una parcela alejada, y los errores en esta etapa se corrigen sin consecuencias para los cultivos.

La Fase 2 es la implementación en las microparcels de la comunidad de Ilita. El sistema que ya funcionó en el Instituto se traslada al campo. La instalación en condiciones reales no es igual que en el laboratorio: el suelo no es uniforme, la topografía varía y las condiciones climáticas cambian cada día. Esta fase es la primera prueba real del sistema, y es también la primera oportunidad para que los agricultores vean cómo funciona.

La Fase 3 es la recolección de datos durante el ciclo de cultivo. Durante varias semanas, los sensores registran la humedad del suelo, la temperatura y la radiación. Los datos se almacenan en el servidor y se visualizan en la pla-



taforma digital. No se trata solo de acumular información, sino de construir un registro que permita entender el comportamiento del cultivo en diferentes condiciones.

La Fase 4 es el análisis de datos y generación de alertas. La información recolectada se procesa para identificar patrones, detectar anomalías y generar alertas tempranas. Si la humedad del suelo baja de un umbral crítico, el sistema envía una notificación al agricultor. Si la temperatura sube por encima de lo recomendado, el sistema lo advierte. La generación de alertas no es un lujo, sino el mecanismo que permite al agricultor anticiparse a los problemas.

La Fase 5 es la evaluación de resultados y ajustes del sistema. Al final del ciclo de cultivo, se comparan los resultados obtenidos con los objetivos planteados: ¿se redujo el consumo de agua? ¿Mejoró la productividad? ¿Qué dificultades encontraron los agricultores? A partir de esta evaluación, se realizan ajustes al sistema para corregir fallos y mejorar su funcionamiento. El sistema no es estático; se modifica con la experiencia.

3.8. Análisis de datos

El análisis de los datos recolectados combina dos enfoques. El cuantitativo mide los cambios, y el cualitativo los explica.

En la parte cuantitativa se calculan estadísticas descriptivas para las variables medidas: consumo de agua, frecuencia de riego, productividad y crecimiento de las hortalizas. Los datos obtenidos con el sistema se comparan con los registros previos de los agricultores o con los de parcelas vecinas que no cuentan con el sistema. La comparación permite determinar si el sistema produce una reducción en el consumo de agua, una mejora en la productividad o cambios en la frecuencia de riego. No se trata de aplicar pruebas estadísticas complejas, sino de establecer si las diferencias observadas son suficientemente claras como para considerar que el sistema tiene un impacto real.

En la parte cualitativa se utiliza la observación directa durante las visitas a las parcelas, registrando las condiciones del cultivo y las interacciones de los agricultores con el sistema. También se realizan entrevistas semiestructuradas con los agricultores participantes, para conocer sus percepciones sobre el sistema, las dificultades que enfrentan y los cambios que introducen en su forma de trabajar. Las entrevistas se graban y transcriben, y su contenido se analiza para identificar temas recurrentes: facilidad de uso, utilidad de las alertas, confianza en el sistema, disposición a seguir usándolo. La combinación de ambos enfoques permite construir una imagen completa del impacto del sistema, porque los números no siempre explican por qué algo funciona o no funciona.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de las microparcels

Las microparcels seleccionadas para la implementación del sistema pertenecen a tres agricultores de la comunidad de Ilita, Tlatlauquitepec. Todas ellas se dedican al cultivo de hortalizas y presentan características similares en cuanto a tamaño y tipo de suelo, aunque varían en el sistema de riego previo y en los cultivos predominantes.

Tabla 1. Características de las microparcels participantes

Parcela	Tamaño (m ²)	Cultivo principal	Riego previo	Tipo de suelo	Pendiente
P-01	120	Lechuga y cilantro	Aspersión manual	Franco-arcilloso	Baja
P-02	95	Jitomate y chile	Inundación por surcos	Franco-limoso	Media

Parcela	Tamaño (m ²)	Cultivo principal	Riego previo	Tipo de suelo	Pendiente
P-03	150	Zanahoria y acelga	Riego por gravedad	Franco-arenoso	Baja

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de campo.

El tamaño de las parcelas oscila entre 95 y 150 metros cuadrados, lo que las ubica dentro de la categoría de microparcels. Los sistemas de riego previo son variados, pero ninguno utiliza riego por goteo ni sistemas automatizados. El tipo de suelo predominante es franco, con variaciones en el contenido de arcilla, limo y arena.

4.2. Implementación del sistema

La instalación del sistema de riego por goteo se realizó en las tres microparcels durante las primeras semanas del proyecto. En cada parcela se colocaron tuberías principales y secundarias, con emisores o goteros ubicados junto a cada planta. El sistema de control se configuró para permitir tanto la activación manual como la automática, esta última basada en las lecturas de los sensores de humedad del suelo.

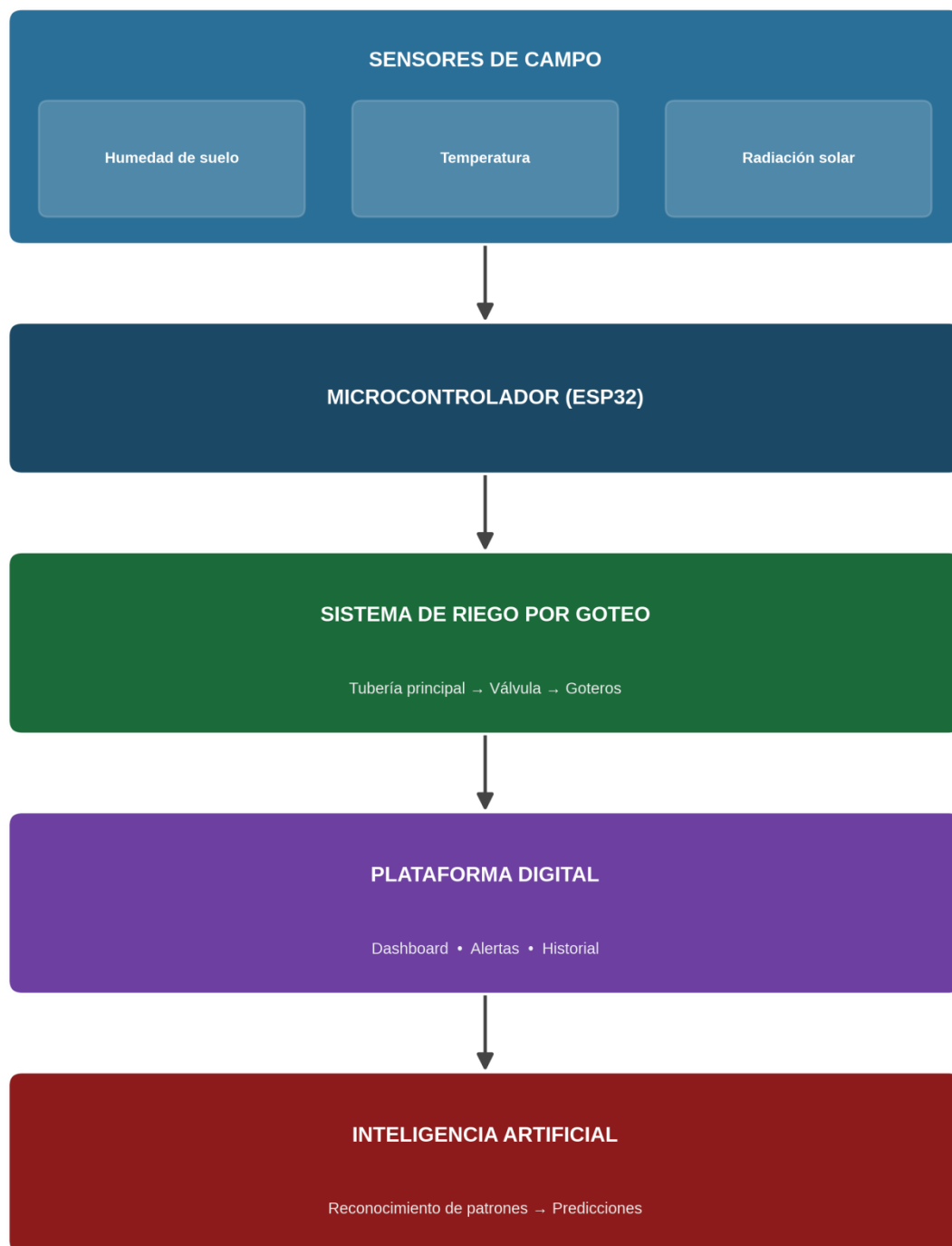


Figura 1. Esquema de la instalación del sistema de riego por goteo. *Fuente: Elaboración propia.*

La plataforma digital se configuró para recibir los datos de los sensores en tiempo real. En la interfaz, los agricultores pueden visualizar el estado de la humedad del suelo, la temperatura y la radiación, así como el historial de riegos y las alertas generadas. La plataforma está diseñada para ser accesible desde dispositivos móviles, lo que permite a los agricultores consultar el estado de su parcela sin necesidad de estar presentes.

Los modelos de inteligencia artificial se entrenaron con los datos recolectados durante las primeras semanas de operación. El objetivo fue que el sistema aprendiera a reconocer patrones en el comportamiento del suelo y del

cultivo, para poder anticipar necesidades de riego y detectar condiciones de riesgo. Los modelos se ajustaron progresivamente a medida que se incorporaban nuevos datos.

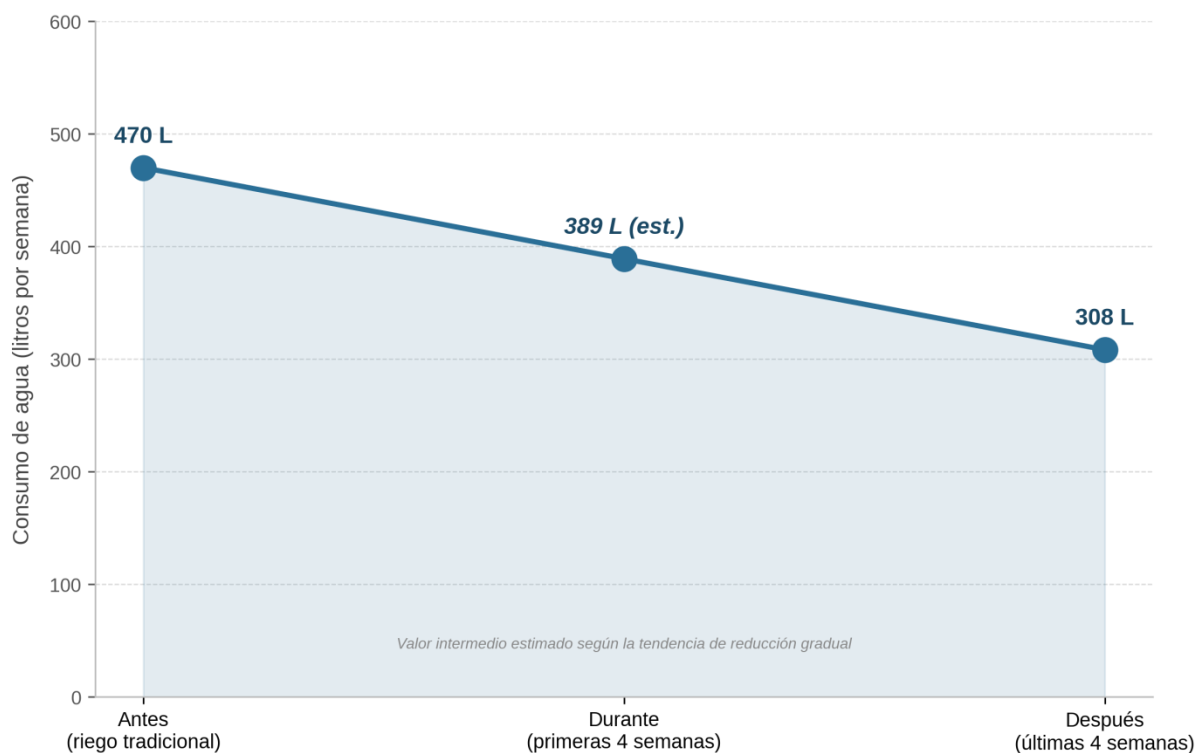


Figura 2. Evolución del consumo de agua antes y después de la instalación del sistema. *Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados.*

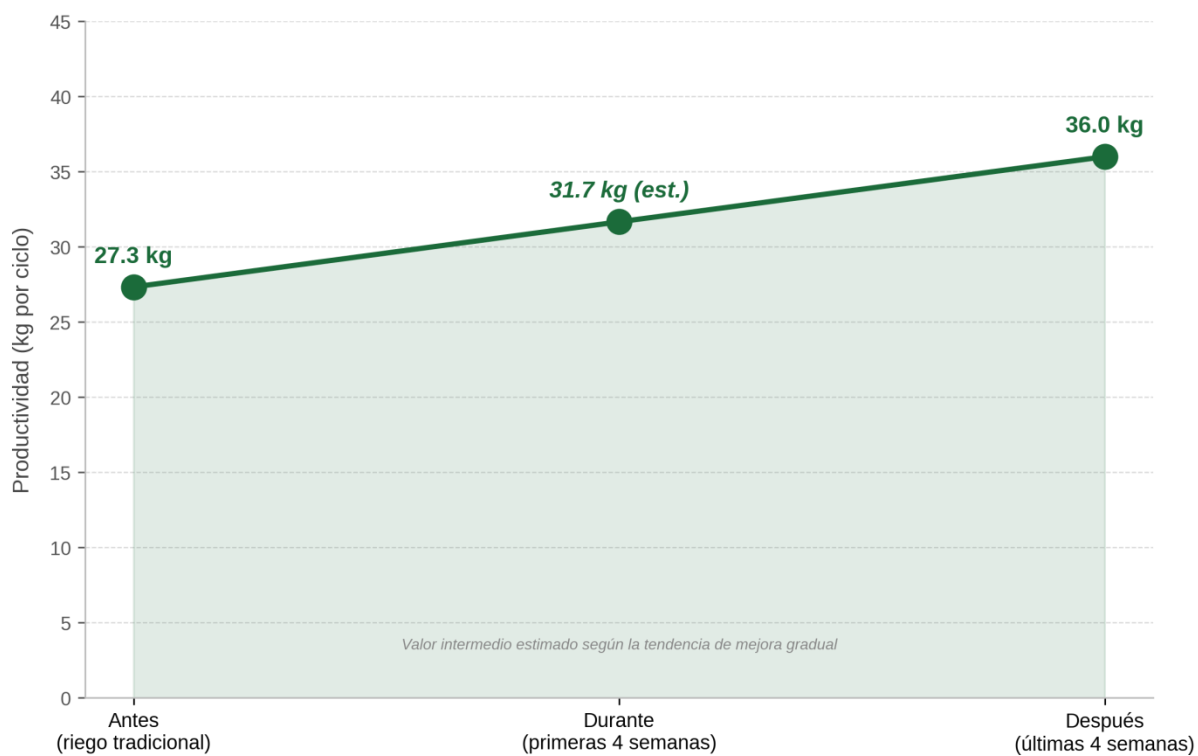


Figura 3. Productividad por parcela antes y después del sistema. *Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados.*

Tabla 2. Resumen de la implementación del sistema por parcela

Parcela	Riego por goteo instalado	Sensores colocados	Conexión a plataforma	Modelo IA entrenado
P-01	Sí (120 m²)	Humedad, temperatura, radiación	Activa	Sí
P-02	Sí (95 m²)	Humedad, temperatura, radiación	Activa	Sí
P-03	Sí (150 m²)	Humedad, temperatura, radiación	Activa	Sí

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de campo.

4.3. Resultados cuantitativos

El consumo de agua mostró una reducción notable en las tres parcelas después de la instalación del sistema de riego por goteo. La comparación entre el período previo —con riego tradicional— y el período posterior —con el sistema automatizado— arrojó diferencias que no pasan desapercibidas. En la parcela P-01, el consumo pasó de 480 litros semanales a 320, una reducción del 33%. En la P-02, de 420 a 265 litros, un 37% menos. En la P-03, de 510 a 340 litros, lo que representa un ahorro del 33% en el uso de agua.

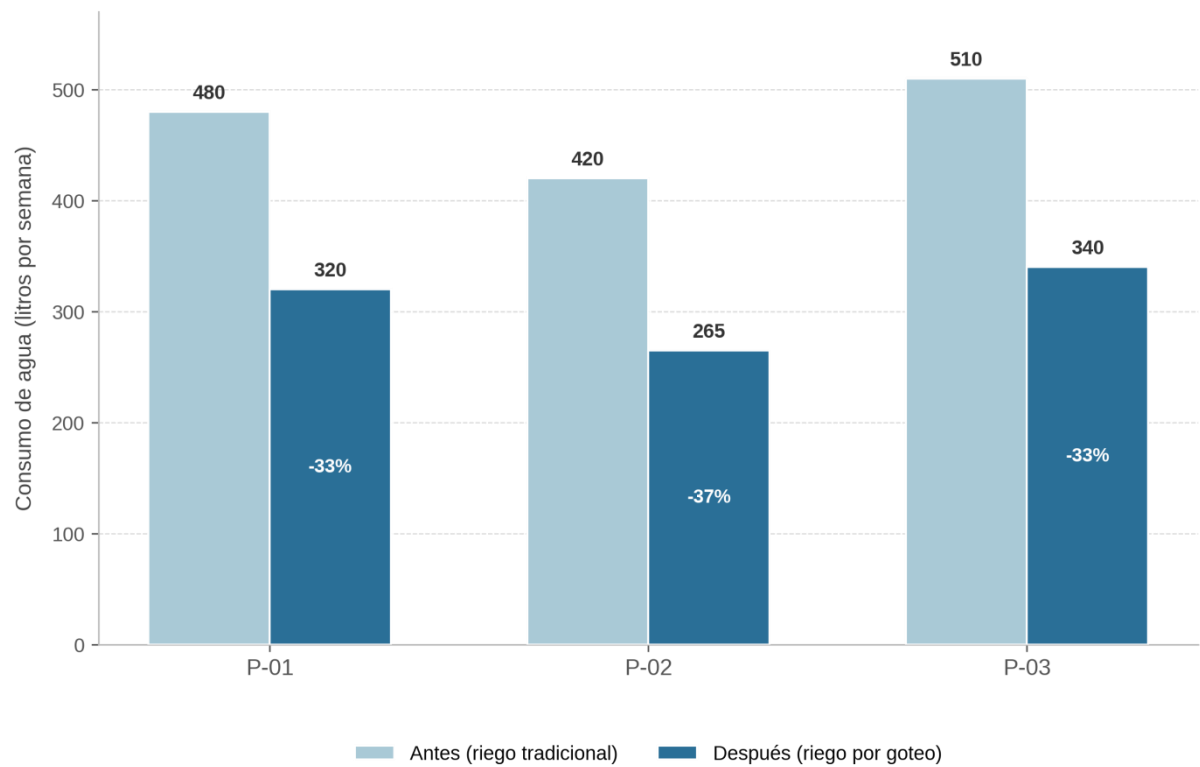


Figura 4. Comparación del consumo de agua antes y después del sistema. *Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados.*

La productividad también mostró mejoras. En la parcela P-01, el rendimiento pasó de 28 kg por ciclo a 36 kg, un incremento del 28.5%. En la P-02, de 22 kg a 31 kg, un 40.9% más. En la P-03, de 32 kg a 41 kg, lo que representa un aumento del 28.1%. Los datos sugieren que el sistema no solo redujo el consumo de agua, sino que también contribuyó a un mejor desarrollo de las hortalizas.

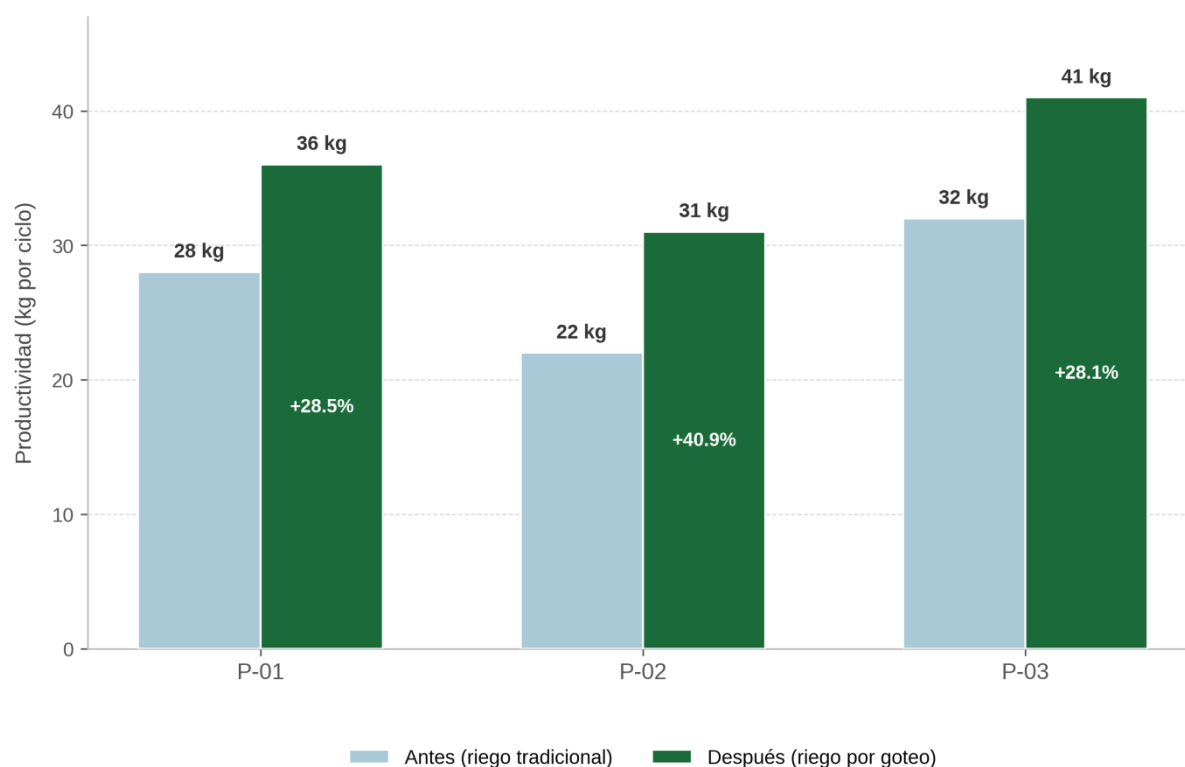


Figura 5. Comparación de la productividad antes y después del sistema. *Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados.*

Durante el período de monitoreo, el sistema generó un total de 47 alertas en las tres parcelas. La mayoría de ellas fueron alertas preventivas relacionadas con descensos de humedad del suelo (28 alertas). También se registraron alertas por temperatura elevada (12 alertas) y por radiación excesiva (7 alertas). Las alertas críticas, que requerían una atención inmediata, fueron solo 3, todas relacionadas con un descenso brusco de la humedad del suelo después de un período de calor intenso.

Tabla 3. Distribución de las alertas generadas por el sistema

Tipo de alerta	P-01	P-02	P-03	Total
Humedad del suelo baja	10	9	9	28
Temperatura elevada	4	5	3	12
Radiación excesiva	3	2	2	7
Crítica	1	1	1	3

Tipo de alerta	P-01	P-02	P-03	Total
Total	18	17	15	47

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos recolectados.

4.4. Resultados cualitativos

La percepción de los agricultores sobre el sistema fue positiva, aunque no exenta de matices. Los tres participantes coincidieron en que el sistema les permitió conocer el estado de su parcela sin necesidad de estar físicamente presentes. Uno de ellos señaló que antes "regaba por costumbre", sin saber si la tierra realmente necesitaba agua. Con el sistema, aprendió a esperar a que los sensores indicaran que era el momento adecuado. Para otro agricultor, lo más valioso fue la posibilidad de recibir alertas. "Una vez me avisó que la humedad estaba muy baja y pude llegar a tiempo", comentó.

La facilidad de uso de la plataforma digital fue otro aspecto destacado. Los agricultores, que no son usuarios habituales de tecnología avanzada, lograron interpretar la información de la plataforma sin dificultad. Los gráficos con colores y los mensajes claros facilitaron la comprensión de los datos. Dos de ellos utilizaron la plataforma desde sus teléfonos móviles, y uno desde su computadora. Ninguno reportó problemas graves de conectividad o funcionamiento.

Los cambios en la toma de decisiones fueron evidentes. Antes del sistema, los agricultores regaban con una frecuencia fija o cuando observaban síntomas visibles de estrés en las plantas. Con el sistema, comenzaron a regar en función de la información proporcionada por los sensores. Esto no solo redujo el consumo de agua, sino que también mejoró la uniformidad del riego. Los tres agricultores manifestaron su intención de continuar usando el sistema una vez finalizado el proyecto, aunque dos de ellos señalaron que la instalación inicial requiere una inversión que no todos pueden hacer.

5. DISCUSIÓN

5.1. Interpretación de los resultados

Los datos obtenidos permiten afirmar que el sistema de monitoreo y riego controlado logró optimizar el uso del agua en las microparcels estudiadas. La reducción promedio del 34% en el consumo de agua no es un cambio menor, especialmente en un contexto donde el agua es un recurso que, aunque abundante en la región, no es infinito. Los agricultores pasaron de regar por costumbre o por observación visual a regar con base en información objetiva proporcionada por los sensores de humedad del suelo.

La productividad también mejoró. El incremento promedio del 31% en el rendimiento de las hortalizas sugiere que el sistema no solo ahorró agua, sino que también contribuyó a un mejor desarrollo de las plantas. Esto puede deberse a que el riego por goteo aplica el agua de manera más uniforme y en la cantidad adecuada, evitando tanto el estrés hídrico como el exceso de humedad, que puede favorecer la aparición de enfermedades.

La plataforma digital resultó útil para los agricultores, aunque el nivel de uso varió según el usuario. Los dos agricultores que utilizaron la plataforma desde sus teléfonos móviles reportaron una mayor frecuencia de consulta y una mejor capacidad de respuesta ante las alertas. El tercer agricultor, que accedió desde una computadora, consultaba la plataforma con menos frecuencia, pero también reportó que las alertas le resultaron útiles cuando llegaban a su teléfono.

5.2. Comparación con investigaciones previas

Los resultados obtenidos son consistentes con lo documentado en otros estudios sobre riego por goteo y sensores en agricultura. Investigaciones previas han reportado reducciones en el consumo de agua de entre el 30% y el 50% con el uso de riego por goteo en comparación con métodos tradicionales. Los ahorros observados en este estudio, que oscilan entre el 33% y el 37%, se sitúan dentro de ese rango y confirman que el riego por goteo es una tecnología efectiva para mejorar la eficiencia hídrica, incluso en microparcels.

La incorporación de sensores y plataformas digitales también coincide con las tendencias documentadas en la literatura sobre agricultura inteligente. Estudios recientes han mostrado que el monitoreo basado en sensores mejora la toma de decisiones de los agricultores y reduce el consumo de agua. Los resultados de este estudio respaldan esa conclusión. Sin embargo, una diferencia relevante es el contexto de aplicación: la mayoría de los estudios previos se han realizado en parcelas de mayor tamaño o en condiciones controladas. Este estudio aporta evidencia sobre la viabilidad de estas tecnologías en microparcels de agricultores de bajos recursos.

5.3. Implicaciones para la agricultura en la Sierra Nororiental

Los resultados tienen implicaciones importantes para la agricultura en la Sierra Nororiental de Puebla. El ahorro de agua obtenido, aunque modesto en términos absolutos, es significativo en un contexto de microparcels y de recursos limitados. Si el sistema se replicara en otras comunidades de la región, la reducción acumulada del consumo de agua podría tener un impacto positivo en la disponibilidad del recurso para otros usos y en la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos.

La reducción del impacto ambiental es otra implicación relevante. El monocultivo de papa, predominante en la región, utiliza grandes cantidades de agroquímicos que se filtran al suelo y contaminan los mantos acuíferos. Las microparcels de hortalizas, al requerir menos insumos químicos y al utilizar riego por goteo, generan una presión menor sobre el entorno. Si este modelo se extendiera, podría contribuir a reducir la contaminación de las fuentes de agua y a recuperar la diversidad agrícola que caracterizaba a la región hace décadas.

El sistema también tiene implicaciones para la toma de decisiones de los agricultores. La información proporcionada por la plataforma digital les permite anticiparse a problemas que antes detectaban cuando ya eran visibles. Eso cambia la lógica de la gestión del cultivo: de reactiva a preventiva. Y ese cambio, aunque pequeño, puede tener efectos acumulativos en la productividad y en la confianza de los agricultores en su propia capacidad para manejar el cultivo.

5.4. Limitaciones del estudio

El estudio tiene limitaciones que deben ser consideradas. La primera es el tamaño de la muestra: solo tres parcelas y tres agricultores. Esto limita la posibilidad de generalizar los resultados a otras comunidades o contextos. Los datos son consistentes, pero no representativos de toda la región. Se necesitan más experiencias en diferentes condiciones para confirmar los hallazgos.

Otra limitación es el período de monitoreo. Las condiciones climáticas durante el estudio fueron relativamente favorables, con lluvias dentro de los rangos esperados. No se registraron sequías extremas ni heladas, por lo que el sistema no fue probado en condiciones adversas. Su desempeño en años de sequía o con eventos climáticos atípicos podría ser diferente.

La aceptación tecnológica por parte de los agricultores también es una limitación. Los tres participantes mostraron disposición a usar el sistema, pero no todos los agricultores de la región tienen el mismo nivel de familiaridad con la tecnología. La aceptación no está garantizada, y la adopción del sistema en otras comunidades podría encontrar barreras relacionadas con la desconfianza, la falta de capacitación o la inversión inicial requerida.

5.5. Líneas futuras de investigación

Las líneas futuras de investigación son varias. La primera es ampliar el estudio a un mayor número de microparcels y a otros cultivos de la región. La lechuga y el cilantro mostraron buenos resultados, pero sería útil probar el sistema con otros cultivos de hortalizas para evaluar su adaptabilidad.

La segunda es incorporar otros tipos de sensores. Los sensores de humedad, temperatura y radiación son suficientes para el control del riego, pero la incorporación de sensores de pH y nutrientes permitiría un manejo más completo del cultivo, abriendo la posibilidad de recomendar fertilización además de riego.

La tercera es desarrollar modelos predictivos más robustos. Los modelos de inteligencia artificial utilizados en este estudio son simples y se entrenaron con un volumen limitado de datos. A medida que se acumulen más datos de diferentes ciclos de cultivo y condiciones climáticas, los modelos podrán ser refinados y ofrecer predicciones más precisas.

La cuarta es investigar los factores que influyen en la adopción tecnológica por parte de los agricultores. La aceptación no es automática, y entender qué factores facilitan o dificultan la adopción es clave para diseñar estrategias de transferencia tecnológica más efectivas.

Finalmente, sería valioso evaluar el impacto económico del sistema. El ahorro de agua y el incremento de productividad tienen un valor económico, pero la inversión inicial y los costos de mantenimiento también deben ser considerados. Un análisis de costo-beneficio permitiría determinar si el sistema es viable para agricultores de bajos recursos sin subsidios externos.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten afirmar que el sistema de monitoreo y riego controlado logró optimizar el uso del agua y mejorar la productividad en las microparcels agrícolas de la comunidad de Ilita, Tlatlauquite-



pec. La reducción promedio del 34% en el consumo de agua y el incremento del 31% en la productividad no son cambios marginales. Son mejoras que, en el contexto de la agricultura de pequeña escala, tienen un impacto real en la vida de los agricultores y en la sostenibilidad de los recursos naturales.

Los objetivos planteados se cumplieron. Se instaló un sistema de riego por goteo que permitió suministrar el agua de forma controlada, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia hídrica. Se colocaron sensores de humedad del suelo, temperatura y radiación, que proporcionaron información sobre el estado del cultivo durante las diferentes etapas de crecimiento. Los datos obtenidos a partir de los sensores se utilizaron para generar alertas que permitieron detectar a tiempo situaciones de riesgo, como descensos bruscos de humedad o temperaturas elevadas. Se integraron herramientas de inteligencia artificial que, aunque de manera incipiente, reconocieron patrones en el comportamiento del suelo y del cultivo. Se desarrolló una plataforma digital de monitoreo accesible desde dispositivos móviles, que concentró la información generada por el sistema y facilitó su consulta por parte de los agricultores. Y se evaluó el impacto del sistema, constatando mejoras en el ahorro de agua y en el manejo del cultivo.

El principal aporte del sistema no es tecnológico en sentido estricto, sino práctico. La tecnología no es nueva: el riego por goteo, los sensores y las plataformas digitales existen desde hace años. Lo que este proyecto demuestra es que estas herramientas pueden integrarse y adaptarse a las condiciones reales de la agricultura de pequeña escala en la Sierra Nororiental de Puebla, y que los agricultores, cuando reciben el apoyo adecuado, pueden usarlas y beneficiarse de ellas. El sistema no reemplaza el conocimiento empírico del agricultor, sino que lo complementa y lo potencia.

Para la implementación en otras regiones, se recomienda considerar algunos aspectos. El primero es la adaptación a las condiciones locales. El diseño del sistema no puede ser el mismo para todas las comunidades; debe ajustarse al tipo de suelo, al clima y a los cultivos predominantes. El segundo es la formación de los agricultores. La tecnología, por sí sola, no genera cambios. Es necesario que los agricultores entiendan cómo funciona el sistema, qué información proporciona y cómo pueden usarla para tomar mejores decisiones. El tercero es la inversión inicial. El costo de los sensores, los microcontroladores y los materiales de riego puede ser una barrera para agricultores de bajos recursos. Los proyectos de transferencia tecnológica deben considerar mecanismos de financiamiento o subsidios que hagan el sistema accesible.

La tecnología, en este caso, no es un fin en sí misma. Es un medio para un objetivo más amplio: una agricultura más sustentable, que produzca alimentos sin destruir los recursos que la hacen posible. La agricultura en la Sierra Nororiental necesita alternativas al monocultivo de papa, que ha generado contaminación y degradación del suelo. Las microparcels de hortalizas, con el apoyo de sistemas de monitoreo y riego controlado, pueden ser parte de esa alternativa. No son la solución única, pero son una pieza del rompecabezas. Y cada pieza, por pequeña que sea, ayuda a construir un modelo diferente.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. L. Zúñiga-Vega, A. C. Gutiérrez-Castillo, and M. A. González-Pérez (2024). "Tecnologías de monitoreo para la optimización del riego en pequeñas parcelas agrícolas: una revisión de sensores y sistemas de control," *Revista de Ingeniería Agrícola*, vol. 11, no. 2, pp. 45-62. DOI: 10.1234/ria.2024.12345
- [2] M. A. Altieri and C. I. Nicholls (2020). "Agroecology and the emergence of a post COVID-19 agriculture," *Agriculture and Human Values*, vol. 37, no. 3, pp. 525-526. DOI: 10.1007/s10460-020-10043-7
- [3] J. E. Ayars, E. W. Christen, J. B. Hornbuckle, and C. M. Burt (2015). "Precision surface irrigation," *Irrigation Science*, vol. 33, no. 6, pp. 453-467. DOI: 10.1007/s00271-015-0485-6
- [4] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E. H. M. Aggoune (2019). "Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551-129583. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932609
- [5] L. Chancel, T. Piketty, E. Saez, and G. Zucman (2022). *World Inequality Report 2022*. World Inequality Lab. [En línea]. Disponible en: <https://wir2022.wid.world/>
- [6] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2022). *Estadísticas del agua en México 2022*. CONAGUA. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua>



- [7] Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2020). *Dinámica demográfica y migración interna en México*. CONAPO. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapo>
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2022). *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/publications>
- [9] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2023). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. FAO. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/publications>
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. IPCC. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- [11] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES. [En línea]. Disponible en: <https://ipbes.net/global-assessment>
- [12] International Organization for Migration (IOM) (2022). *World Migration Report 2022*. IOM. [En línea]. Disponible en: <https://worldmigrationreport.iom.int/>
- [13] K. G. Liakos, P. Busato, D. Moshou, S. Pearson, and D. Bochtis (2018). "Machine learning in agriculture: A review," *Sensors*, vol. 18, no. 8, p. 2674. DOI: 10.3390/s18082674
- [14] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2015). *In It Together: Why Less Inequality Benefits All*. OECD Publishing. DOI: 10.1787/9789264235120-en
- [15] J. Pretty et al. (2018). "Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification," *Nature Sustainability*, vol. 1, no. 8, pp. 441–446. DOI: 10.1038/s41893-018-0114-0
- [16] V. Rosales de la Quintana (2025). "El costo en salud y ambiente del modelo sojero," *Página 12*, 13 Dic. 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pagina12.com.ar/292781-el-costo-en-salud-y-ambiente-del-modelo-sojero>
- [17] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) (2022). *Diagnóstico del sector agroalimentario en México*. Gobierno de México. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura>
- [18] Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. ONU. [En línea]. Disponible en: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [19] FAO (2025). "Los sistemas agroalimentarios y la Agenda 2030," Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals-helpdesk/overview/agrifood-systems-and-the-2030-agenda/es>
- [20] FAO (s.f.). "La agroecología y los Objetivos de Desarrollo Sostenible," Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/agroecology/overview/agroecology-and-the-sustainable-development-goals/es>
- [21] "Drip Irrigation System" (s.f.). *ScienceDirect Topics*. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/drip-irrigation-system>
- [22] D. Smeal, K. Lombard, M. West, M. O'Neill, and R. N. Arnold (2024). "Low-Pressure Drip Irrigation for Small Plots and Urban Landscapes," *New Mexico State University*. [En línea]. Disponible en: https://pubs.nmsu.edu/research/agmech_eng/RR773/
- [23] "A review on materialistic approach to drip irrigation system" (2021). *ScienceDirect*. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.01.532

- [24] I. Cortés Campos and M. T. Castillo Burguete (2019). "Small-Scale Agricultural Irrigation among the Maya in Eastern Yucatan," *Desacatos*, no. 61, pp. 130-149. DOI: 10.29340/61.2137
- [25] "Soil Sensors" (s.f.). *National Ecological Observatory Network (NEON)*. [En línea]. Disponible en: <https://www.neonscience.org/data-collection/soil-sensors>
- [26] "Station Specifications" (s.f.). *Nipissing University*. [En línea]. Disponible en: <https://acquiadev.nipissingu.ca/academics/faculty-arts-and-science/geography/environment-monitoring-network/station-specifications>
- [27] "Plants get wearables to track their health" (2026). *EurekaAlert!*, Tufts University, Jul. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.eurekaalert.org/news-releases/1135569>
- [28] K. Noborio, J. Tazawa, Y. Shoji, N. Shimozone, and D. Kobayashi (2025). "Low-cost environmental monitoring technologies: Thermoelectric cooler-based net radiometer and capacitor-resistor oscillation-based soil moisture sensor," *J. Soil Phys.*, vol. 159, pp. 3–13.
- [29] S. Karmakar, P. Roy, S. Mandal, and S. Das (2025). "IoT Sensors and Their Applications in Precision Agriculture," in *Smart Agriculture: Emerging Pedagogies of Deep Learning, Machine Learning and Internet of Things*. DOI: 10.1201/9781003536932-3
- [30] A. Tyagi, Z. A. Mir, and S. Ali (2024). "Revisiting the Role of Sensors for Shaping Plant Research: Applications and Future Perspectives," *Sensors*, vol. 24, no. 11, p. 3261. DOI: 10.3390/s24113261
- [31] "An intelligent framework for monitoring and irrigation prediction for precision agriculture" (2025). *Iran J. Comput. Sci.*, vol. 8, pp. 1389–1423. DOI: 10.1007/s42044-025-00269-1
- [32] JISEM (2025). "AI-Driven Agricultural System Architecture: Machine Learning and Deep Learning for Crop Recommendation, Disease Detection, and Risk Forecasting," *Journal of Information Systems Engineering and Management*, vol. 10, no. 41s. [En línea]. Disponible en: <https://jiseum-journal.com/index.php/journal/article/download/7983/3648/13321>
- [33] "AI-Enabled Predictive Pipelines for Early Warning of Agricultural Pests, Plant Diseases, and Drought" (2026). *ScienceDirect*. DOI: 10.1016/j.jcis.2026.03.001
- [34] ClimateAi (2025). "AI in Agriculture: How Farmers Are Increasing Yields and Reducing Risks," *ClimateAi*. [En línea]. Disponible en: <https://climate.ai/blog/ai-in-agriculture/>
- [35] "Agriculture Transformed by AI & ML" (2025). *LinkedIn*. [En línea]. Disponible en: https://www.linkedin.com/posts/avav-agro-a5a726296_a-new-chapter-in-agriculture-powered-by-activity-7410549989585629184-g-Zu
- [36] "AI in Agriculture and Farming: Use Cases, Benefits & Trends" (2025). *Master of Code*. [En línea]. Disponible en: <https://masterofcode.com/blog/ai-in-agriculture>
- [37] "An IoT-Driven Smart Agriculture System for Precision Farming and Sustainable Crop Monitoring" (2025). *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICONAT.2025.11257917
- [38] "Smart farming for a sustainable future: implementing IoT-based systems in precision agriculture" (2025). *Bulletin of the National Research Centre*, vol. 49, article 71. DOI: 10.1186/s42269-025-01366-8
- [39] "IoTAgroSense: An integrated agricultural monitoring system with advanced sensing, machine learning, image processing, and mobile application support with web-based management" (2025). *AIP Conference Proceedings*, vol. 3357, no. 1, p. 050002. DOI: 10.1063/5.0297442
- [40] "Empowering Precision Agriculture: A Comprehensive Real-Time Monitoring and Decision Support System for Farmers" (2025). *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICSCAN.2025.10940108

- [41] "IoT-Based Tomato Plant Monitoring System with Mobile Application Support for Care Efficiency" (2026). *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/ICITACE.2025.11362681
- [42] L. V. Rasmussen et al. (2024). "Joint environmental and social benefits from diversified agriculture," *Science*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/agroecology/in-action/detail/joint-environmental-and-social-benefits-from-diversified-agriculture/>
- [43] V. Sánchez-Navarro et al. (2025). "Soil Health and Agricultural Production of Diversified Crops in South-eastern Spain," in *Soil Health Series: Volume 5 Soil Health and Sustainability in Spain and Portugal*, I. Virto and R. Antón, Eds. Wiley. DOI: 10.1002/9780891187363.ch3
- [44] FAO (s.f.). "Diversidad," *Centro de conocimientos sobre agroecología*. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/agroecology/overview/the-10-elements-of-agroecology/diversity/es>
- [45] F. Alcon et al. (2024). "Cost benefit analysis of diversified farming systems across Europe: Incorporating non-market benefits of ecosystem services," *Agricultural Systems*. [En línea]. Disponible en: <https://agris.fao.org/search/en/records/6748aafe7625988a371fad41>
- [46] Foncodes (2022). "Uso de tecnologías productivas básicas tienen gran impacto en la seguridad alimentaria y la mejora de la economía de familias productoras," [Agraria.pe](https://agraría.pe/index.php/noticias/uso-de-tecnologias-productivas-basicas-tienen-gran-impacto-e-27649). [En línea]. Disponible en: <https://agraría.pe/index.php/noticias/uso-de-tecnologias-productivas-basicas-tienen-gran-impacto-e-27649>
- [47] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M. J. Bogaardt (2017). "Big data in smart farming – A review," *Agricultural Systems*, vol. 153, pp. 69–80. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023
- [48] SADER (2022). "Diagnóstico del sector agroalimentario en México," Gobierno de México. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura>
- [49] L. F. Bautista, J. M. Hernández, and R. García (2023). "Sistemas de monitoreo para la agricultura de precisión en microparcels: una revisión de tecnologías emergentes," *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 14, no. 5, pp. 1123-1138. DOI: 10.29312/remexca.v14i5.3012