
DISEÑO DE PROTOTIPO PARA DOSIFICACIÓN AUTOMATIZADO CON ARDUINO Y MONITOREO EN CARGA DE FERTILIZANTES DE EMPRESAS AGRÍCOLAS EN SINALOA

PROTOTYPE DESIGN FOR AUTOMATED DOSING WITH ARDUINO AND FERTILIZER LOAD MONITORING FOR AGRICULTURAL COMPANIES IN SINALOA

Torres Medina José

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis
<https://orcid.org/0009-0007-5915-613X>
jose.tm@mochis.tecnm.mx

López Nieblas Christian Marcel

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis
<https://orcid.org/0009-0004-0862-3496>
christian.ln@mochis.tecnm.mx

Valenzuela Edeza Ramón

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis
<https://orcid.org/0009-0005-7832-5432>
ramon.ve@mochis.tecnm.mx

Avilés Torres Mariano de Jesús

Tecnológico Nacional de México/ I.T. De Los Mochis
<https://orcid.org/0009-0006-1178-667X>
mariano.at@mochis.tecnm.mx

DOI: <https://doi.org/10.61273/neyart.v4i1.173>

Recibido: 20/12/2025 | Aceptado: 27/02/2026 | Publicado: 01/04/2026

Esta obra está bajo
una licencia internacional
Creative Commons Atribución 4.0.



Resumen-- En el norte de Sinaloa, la carga de fertilizantes granulados aún se realiza de forma manual o con mecanización limitada, lo que provoca ineficiencias operativas, riesgos de seguridad y variaciones en la dosificación. Este artículo presenta el diseño e implementación de un prototipo de *dosificadora* automatizada, un sistema estacionario de dosificación y carga controlado mediante un microcontrolador Arduino y supervisado por una aplicación móvil. El objetivo es mejorar la eficiencia operativa, la precisión de dosificación y la seguridad del personal en empresas agrícolas de la región. La metodología contempla el análisis del proceso tradicional, el diseño de una arquitectura con tolva, dosificador gravimétrico con celdas de carga, actuadores controlados por Arduino e interfaz de monitoreo remoto, además de la simulación de tiempos de carga. Los resultados teóricos muestran reducciones del 25–40% en tiempo de carga, precisiones cercanas a $\pm 1\%$ y menor exposición del personal a polvo y esfuerzo físico. Finalmente, se discuten las barreras de adopción y los beneficios en productividad, ergonomía y trazabilidad.

Palabras clave-- Aplicación, Arduino, Automatización agrícola, dosificación de fertilizantes, monitoreo, seguridad laboral.

Abstract -- In northern Sinaloa, the loading of granular fertilizers is still carried out manually or with limited mechanization, which leads to operational inefficiencies, safety risks, and variations in dosing. This article presents the design and implementation of a prototype automated dispenser, a stationary dosing and loading system controlled by an Arduino microcontroller and supervised through a mobile application. The objective is to improve operational efficiency, dosing accuracy, and personnel safety in agricultural companies in the region. The methodology includes an analysis of the traditional process, the design of an architecture with a hopper, gravimetric dispenser with load cells, actuators controlled by Arduino, and a remote monitoring interface, as well as the simulation of loading times. Theoretical results show reductions of 25–40% in loading time, accuracies close to $\pm 1\%$, and lower exposure of personnel to dust and physical strain. Finally, adoption barriers and benefits in productivity, ergonomics, and traceability are discussed.

Keywords: Agricultural, application, Arduino, automation, fertilizer dosing, monitoring, occupational safety.

INTRODUCCIÓN

La región norte de Sinaloa, posicionada estratégicamente gracias a la conectividad del puerto de Topolobampo, se distingue por su alta productividad agrícola y el uso de tecnologías avanzadas en cultivos como maíz, trigo y hortalizas (INEGI, 2024). A pesar del grado de tecnificación alcanzado en diversas etapas del proceso agrícola, persisten prácticas manuales en la carga de fertilizantes sólidos, particularmente en la transferencia hacia sembradoras, esparcidores y equipos de fertirriego. Estas prácticas, basadas en el manejo de sacos de 50 kg, generan cuellos de botella operativos y afectan la eficiencia y seguridad del personal, además de introducir variaciones en la dosis aplicada, generalmente estimadas de forma empírica con errores entre $\pm 5-8\%$ (CIMMYT, 2025).

En contraste, sectores industriales y agroindustriales han adoptado ampliamente sistemas automatizados para dosificación y manejo de materiales, lo cual ha demostrado mejoras significativas en eficiencia, precisión y trazabilidad (Universal Robots, s. f.). La automatización mediante sistemas gravimétricos permite alcanzar errores cercanos a $\pm 1\%$, facilitando una aplicación uniforme de nutrientes y reduciendo desperdicios (Ortiz Henao et al., 2010). Sin embargo, su adopción en la agroindustria regional aún es limitada debido a barreras económicas, culturales y de infraestructura tecnológica (López et al., 2023).

En este contexto surge la pregunta central: ¿En qué medida la implementación de una dosificadora automatizada puede mejorar la eficiencia, precisión, seguridad y optimización de tiempos en las actividades de carga de fertilizantes en empresas agrícolas del norte de Sinaloa?, para responderla, este estudio propone el diseño de un prototipo basado en microcontrolador Arduino y supervisado mediante una aplicación móvil, evaluando su viabilidad técnica y los beneficios potenciales.

DESARROLLO

Marco teórico

El desarrollo de una dosificadora automatizada requiere comprender los fundamentos de la dosificación de fertilizantes, la automatización aplicada a procesos agrícolas y las condiciones regionales que influyen en su operación.

a) Manejo y dosificación de fertilizantes

La dosificación agrícola se realiza mediante métodos volumétricos o gravimétricos. Los primeros regulan la cantidad según el tiempo de apertura o ajustes mecánicos, aunque son simples y de bajo costo, presentan alta sensibilidad a la densidad aparente, humedad y fluidez del material (CIMMYT, 2025). Los segundos emplean celdas de carga para pesar directamente el fertilizante, alcanzando precisiones de $\pm 1-2\%$ y

permitiendo registro de datos, por lo que son preferidos en agricultura de precisión (Ortiz Henao et al., 2010; XJCSSENSOR, 2023). La correcta dosificación es fundamental para optimizar el uso de nutrientes y minimizar impactos ambientales, estudios demuestran que una calibración adecuada reduce sobredosificaciones superiores al 5% y que sistemas microcontrolados pueden alcanzar precisiones cercanas al $\pm 1\%$ (Ortiz Henao et al., 2010). Esto evidencia la necesidad de tecnologías automatizadas que garanticen uniformidad y exactitud en campo.

La importancia de mejorar la precisión está sustentada en el hecho de que hasta el 40% del nitrógeno aplicado en cultivos intensivos puede perderse por prácticas de manejo inefficientes, afectando la productividad y elevando el costo por hectárea (Fageria, 2016).

b) Automatización industrial aplicada al agro

La automatización agrícola integra tecnologías electrónicas, neumáticas y computarizadas para ejecutar tareas repetitivas con alta precisión. Un sistema de dosificación automatizado incorpora microcontroladores como Arduino o ESP32, sensores de peso y nivel, interfaces HMI y conectividad IoT para monitoreo remoto, además de actuadores confiables para accionar sinfines, compuertas o bandas (López et al., 2023; Rivera-Méndez et al., 2021). Aunque la adopción en el sector agrícola ha sido más lenta que en la industria, su uso en operaciones estacionarias es técnicamente viable y mejora la seguridad al reducir la manipulación manual de cargas. En México, la NOM-006-STPS-2014 exige minimizar el manejo manual de materiales pesados y utilizar equipos auxiliares para reducir riesgos ergonómicos y de exposición a agentes peligrosos (STPS, 2014), reforzando la pertinencia de sistemas como la dosificadora automatizada para cumplir con la normativa y profesionalizar las operaciones.

c) Condiciones regionales del norte de Sinaloa

El diseño del sistema considera las particularidades de la región: alta estacionalidad en la demanda agrícola, (CONAGUA, 2023) se han documentado condiciones climáticas extremas (temperaturas elevadas, radiación, polvo y humedad), y materiales corrosivos como fertilizantes higroscópicos, lo que exige recubrimientos epóxicos, acero inoxidable y protección eléctrica con gabinetes IP65 para prolongar la vida útil de los equipos (SADER, 2024). La variabilidad en la capacitación del personal hace necesaria una interfaz intuitiva en español y controles industriales robustos, acompañados de capacitación continua. La diversidad de escalas productivas demanda soluciones escalables, desde sistemas estacionarios de alta

capacidad hasta versiones móviles o semimóviles para uso compartido. Además, pueden implementarse esquemas de financiamiento cooperativo para facilitar su adopción.

En conjunto, las condiciones técnicas, climáticas y socioeconómicas del norte de Sinaloa crean un escenario favorable para implementar sistemas automatizados de manejo de fertilizantes (INEGI, 2024). A pesar de los desafíos asociados al clima, la capacitación y la diversidad productiva, la región cuenta con la infraestructura y el interés tecnológico necesarios para garantizar la viabilidad operativa de la dosificadora automatizada, sentando las bases para el diseño y evaluación presentados en la metodología.

d) **Tecnología de Arduino**

La tecnología de Arduino representa una plataforma de hardware y software de código abierto ampliamente utilizado en el desarrollo de sistemas embebidos y prototipos de automatización. Su arquitectura basada en microcontroladores AVR, ARM o ESP32, junto con un entorno de programación accesible, permite implementar algoritmos de control, adquisición de datos y comunicación serial con alta eficiencia y bajo costo (Banzi & Shiloh, 2022). Arduino destaca por su versatilidad para integrar sensores y actuadores mediante pines digitales, analógicos y PWM, además de soportar protocolos de comunicación como I2C, SPI y UART. Su ecosistema de bibliotecas y placas de expansión favorece el diseño modular de sistemas orientados a medición, control y conectividad inalámbrica (Monk, 2019; Margolis, 2020).

e) **Software de Aplicación**

El software de aplicación comprende programas diseñados para ejecutar funciones específicas orientadas al usuario o a procesos especializados dentro de un sistema informático. A diferencia del software de sistema, cuyo propósito es administrar recursos del hardware, el software de aplicación facilita actividades como procesamiento de datos, supervisión, control y análisis en sistemas automatizados (Sommerville, 2016). Su arquitectura puede basarse en modelos cliente-servidor.

En automatización agrícola, el software de aplicación es crucial para permitir la interacción entre el usuario y los sistemas físicos de control. Aplicaciones móviles, interfaces web y plataformas IoT permiten monitorear variables operativas, gestionar la dosificación, almacenar registros y visualizar parámetros en tiempo real. Estas herramientas incrementan la precisión, trazabilidad y eficiencia en tareas como fertilización, riego y logística agrícola (Wolfert et al., 2017; Liakos et al., 2018). Integrado con microcontroladores o PLCs, el software de aplicación habilita operaciones remotas, diagnósticos y

decisiones basadas en datos, fortaleciendo la automatización y seguridad en los procesos (Nguyen et al., 2020).

f) **Sistemas automatizados**

Los sistemas automatizados son conjuntos de dispositivos, sensores, controladores y software diseñados para ejecutar tareas con mínima intervención humana. Estos sistemas integran componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y computacionales para realizar operaciones de forma precisa, repetible y eficiente. La automatización permite reducir variabilidad, mejorar tiempos de operación y aumentar la seguridad, especialmente en entornos industriales y agroindustriales (Groover, 2020).

Metodología

La naturaleza de este estudio es aplicada y de factibilidad, combinando investigación de campo con el desarrollo de un prototipo funcional. La metodología siguió varias etapas complementarias. Primero, se realizó un levantamiento de requerimientos mediante entrevistas con encargados de campo y jefes de maquinaria para caracterizar el manejo actual de fertilizantes: tipos más utilizados (urea, DAP/MAP, sulfato de amonio, mezclas NPK), presentaciones comunes (sacos de 50 kg y granel), volúmenes típicos por carga (200–1500 kg) y equipos receptores como esparcidores, tolvas camioneras y big-bags (maxi bolsas).

Posteriormente, se efectuó un análisis del proceso actual, registrando tiempos de carga manual y semimecanizada. Se identificó que 2–3 personas tardan entre 10 y 15 minutos en vaciar 1 tonelada, además de múltiples riesgos operativos (levantamiento repetitivo, caídas, exposición a polvo). Estos datos permitieron establecer la línea base para cuantificar los beneficios potenciales de la automatización.

Con esta información se elaboró un diseño conceptual de la dosificadora automatizada, integrando:

- Una tolva madre de 2 a 5 toneladas con recubrimiento anticorrosivo.
- Un dosificador gravimétrico con 3 a 4 celdas de carga y precisión esperada de $\pm 1.5\%$.
- Un sistema de descarga por compuerta neumática con apertura fina.
- Una estructura soporte con 3 metros de altura libre y accesos seguros.
- Un panel de control con Arduino Mega, HMI básica, mandos de seguridad y opción de registro o ticket digital.
- Un sistema de mitigación de polvo mediante faldones y campana de extracción.
- Medidas de seguridad eléctrica y mecánica conforme a operación en 220V/440V.

A partir del diseño conceptual, se seleccionaron componentes comerciales y se construyó un prototipo a escala para pruebas iniciales.

Luego se realizó una simulación y estimación de tiempos, comparando el método manual con el automatizado. Con base en capacidades de sinfines comerciales, se estimó que una carga de 1 tonelada podría completarse en 4 a 6 minutos, frente a los 10 a 15 minutos del sistema manual, representando un ahorro del 25 a 60%.

Finalmente, se desarrolló una evaluación económica preliminar, estimando un costo total del sistema entre \$300,000 y \$500,000 MXN. Con ahorros laborales aproximados de \$100,000 MXN por temporada y un aumento en la disponibilidad de maquinaria, se proyectó un periodo de recuperación de 2 a 4 años en operaciones de uso intensivo. Para empresas pequeñas, los tiempos serían mayores, por lo que se sugieren modelos de uso compartido para mejorar la rentabilidad.

En conjunto, esta metodología integra investigación cualitativa, diseño ingenieril y análisis económico, sentando las bases para la propuesta final del prototipo de dosificadora automatizada.

Resultados y discusión

Aunque este trabajo se centró en el diseño y la simulación, es posible anticipar los efectos cuantitativos y cualitativos de implementar la dosificadora automatizada, contrastándolos con el método tradicional, así la factibilidad técnica de la dosificadora automatizada ha sido demostrada a nivel conceptual y con un prototipo funcional, su adopción práctica puede enfrentar diversos retos económicos, operativos y humanos que trascienden los aspectos de ingeniería.

Reducción en los tiempos de carga, el método manual requiere entre 10 y 15 minutos por tonelada con 2 a 3 operarios, mientras que el sistema automatizado podría completarla en 3 a 6 minutos, dependiendo del transportador. Esto implica un ahorro del **25 a 60%**, permitiendo realizar más viajes de fertilización por día y cubrir mayores superficies dentro de la ventana óptima de aplicación.

En la Figura 1 se muestran los tiempos promedios en minutos por tonelada de descarga de fertilizante en cada método, manual y automatizado, observamos que el automatizado reduce los minutos promedio de manera considerable, mientras que realizarlo manualmente aumenta estos tiempos en la descarga del producto.

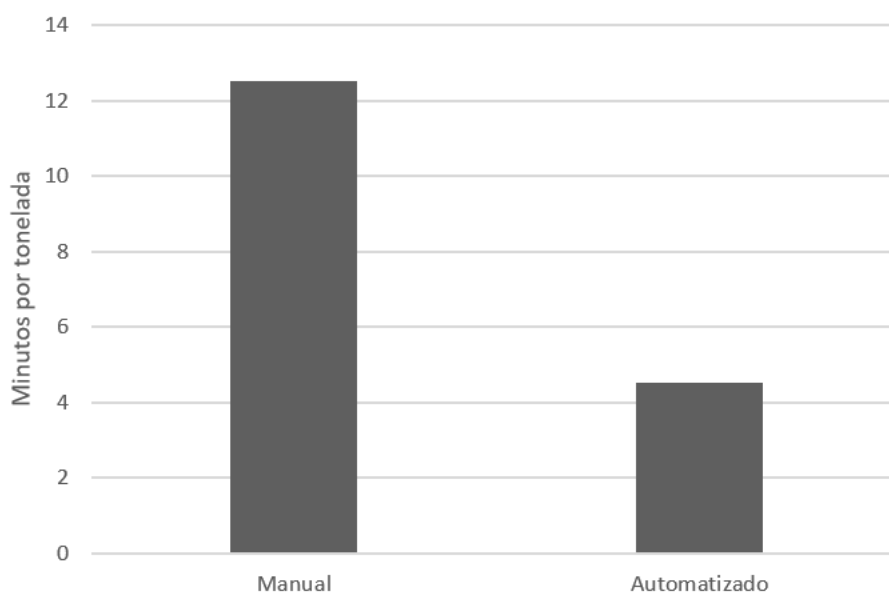


Figura 1. Descarga en minutos por tonelada Manual VS Automatizado.

La automatización es más rentable cuando existe un alto flujo de cargas por día, típico de las temporadas de siembra y fertilización. En periodos de baja demanda, el equipo podría subutilizarse. Como alternativa, se sugiere un modelo de **servicio compartido** entre productores o la creación de equipos móviles que atiendan múltiples puntos, optimizando la utilización del sistema.

Automatizar reduce la intervención de 2 a 3 personas a **un solo operador**, con apoyo ocasional para recargar la tolva madre. Esto disminuye costos laborales y libera personal para otras tareas críticas durante las temporadas pico.

En la Figura 2 se observa la cantidad de personal en la operación de descarga de fertilizante en cada método, manual y automatizado, analizamos que el proceso automatizado puede llegar a reducir esta intervención de mano de obra a 1 persona, mientras que al realizarlo manualmente sería necesario incrementar hasta 3 el número de personal para su adecuada operación.

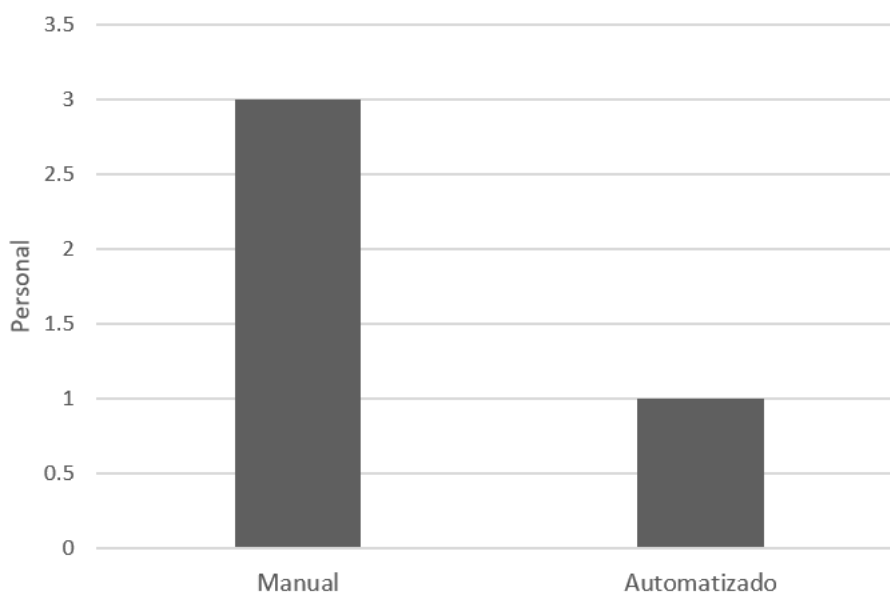


Figura 2. *Intervención del personal Manual VS Automatizado.*

La automatización puede generar percepciones de desplazamiento laboral, aunque la escasez de personal capacitado durante temporadas pico indica que la intención es **reubicar** al personal hacia tareas de mayor valor agregado, como supervisión, preparación de mezclas o mantenimiento. La capacitación temprana y la participación del personal en las fases piloto favorecen la aceptación, especialmente al evidenciar mejoras en seguridad y reducción del esfuerzo físico.

Así mismo se incrementa la precisión de la dosificación, en donde la dosificación manual presenta variaciones de ± 5 a 8%, mientras que el sistema gravimétrico automatizado podría alcanzar precisiones de ± 1 a 1.5%, consistentes con estándares de agricultura de precisión. La mayor exactitud genera beneficios directos:

- Menor desperdicio de fertilizante y reducción de riesgos ambientales.
- Mayor uniformidad en el desarrollo del cultivo.
- Mejor control económico del insumo al aplicar solo la cantidad necesaria.

En la Figura 3 se presentan los porcentajes de variaciones de precisión en el proceso de dosificación de descarga de fertilizante de cada método, manual y automatizado, podemos definir que al automatizar se puede llegar a tener una variación en la precisión en descarga de hasta el 1%, mientras que al realizar este proceso manualmente puede incrementar esta variación hasta 8% al momento de su dosificación.

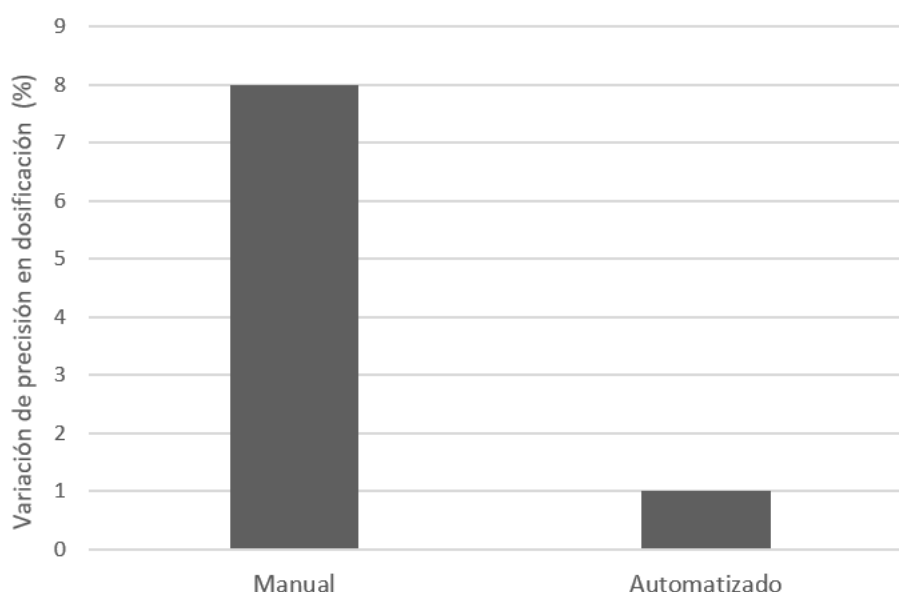


Figura 3. Variación de precisión en dosificación Manual VS Automatizado.

El comportamiento de flujo varía según el tipo de fertilizante, su granulometría y humedad. Aunque el diseño contempla vibración y geometría para asegurar el flujo masivo o continuo, será necesario ajustar parámetros de operación y recalibrar las celdas de carga al cambiar de material. Se recomienda probar el sistema en la fase piloto con las principales formulaciones utilizadas en la región para asegurar operación estable.

Al eliminar el manejo manual de sacos, disminuyen riesgos musculoesqueléticos, caídas y exposición al polvo químico. El operador trabaja a distancia segura del punto de descarga y en condiciones controladas, cumpliendo con los lineamientos de la **NOM-006-STPS** sobre manejo de materiales pesados. Esto contribuye a una operación más segura, saludable y profesionalizada.

La integración con aplicaciones móviles y la posibilidad de conectar la dosificadora a plataformas en la nube permiten vislumbrar futuras aplicaciones: sincronización con sistemas de fertilización variable, automatización de pedidos de insumo o integración con plataformas de logística agrícola. Estos avances se alinean con tendencias de agricultura inteligente y podrían ampliarse conforme madure la adopción tecnológica en el sector.

De igual manera fortalecemos la trazabilidad e inventarios, ya que cada carga queda registrada automáticamente (fecha, peso, usuario y cliente/lote), lo que permite:

- Conocer el consumo real y el stock disponible.
- Generar tickets o comprobantes para clientes internos o externos.
- Analizar patrones de uso para optimizar logística y programación del servicio.

Además, estos registros facilitan auditorías y reducen conflictos por discrepancias en cantidades entregadas.

Además de los beneficios medibles, la automatización aporta profesionalización al servicio mediante registros digitales, transparencia en las entregas y reducción de disputas por cantidades. También refuerza la seguridad laboral y el cumplimiento normativo, contribuyendo a una reputación empresarial más sólida. Por otro lado, tenemos una viabilidad económica y mejora de la productividad, aunque la inversión inicial puede ser alta para empresas pequeñas, los ahorros en tiempo y mano de obra, sumados al incremento en capacidad operativa, permiten proyectar un retorno de inversión de **2 a 4 años** en operaciones de uso intensivo. En empresas con muchas cargas diarias, reducir 5 a 10 minutos por operación puede traducirse en horas adicionales de trabajo efectivo por día. A ello se suma el valor intangible generado por mayor precisión, profesionalización del servicio y reducción de reclamaciones gracias a la trazabilidad.

El costo inicial de la automatización puede resultar elevado para pequeñas empresas acostumbradas al método manual de carga, percibido como de bajo costo. Esta resistencia se ve reforzada por prácticas arraigadas y la subestimación de los beneficios operativos. Sin embargo, en empresas de mayor escala o centros de servicio agrícola, donde se manejan altos volúmenes, la inversión puede amortizarse rápidamente y generar ventajas competitivas. Por ello, la introducción inicial podría enfocarse en actores con mayor capacidad de adopción o mediante proyectos piloto demostrativos.

Hasta el momento no se han realizado pruebas en campo a escala industrial. Los resultados se basan en simulaciones y en un prototipo a pequeña escala, por lo que será necesario validar el desempeño en condiciones reales, especialmente en lo referente a ciclos prolongados de trabajo, fallas potenciales, variaciones de voltaje y comportamiento mecánico a largo plazo. Para uso industrial será necesario dimensionar adecuadamente motores, implementar balanzas certificadas para transacciones comerciales y migrar de Arduino a PLC industrial. No obstante, la arquitectura general del sistema continúa siendo válida y escalable.

CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de dosificadora automatizada demuestra la viabilidad técnica y el potencial impacto operativo de la automatización en la dosificación y carga de fertilizantes en el norte de Sinaloa. Los resultados del estudio permiten concluir lo siguiente: La automatización puede reducir los tiempos de carga entre 25 a 40%, incrementando la disponibilidad de la maquinaria y acelerando las labores de fertilización en periodos críticos, lo que mejora la eficiencia general del proceso agrícola. El sistema gravimétrico propuesto alcanza una dosificación con un error aproximado de $\pm 1\%$, significativamente superior a los métodos manuales. Esto favorece una distribución uniforme de nutrientes, disminuye desperdicios y reduce el impacto ambiental asociado a la sobreaplicación. Al eliminar la manipulación manual de cargas pesadas, se reducen riesgos de lesiones, accidentes y exposición a polvos químicos. Este cambio mejora las condiciones de trabajo y contribuye al cumplimiento de la NOM-006-STPS en materia de manejo seguro de materiales. La digitalización del registro de cargas permite documentar fecha, peso y destino de cada operación, fortaleciendo la transparencia, el control interno de insumos y las bases para sistemas de agricultura inteligente. En empresas medianas o grandes, o bajo esquemas compartidos, la automatización puede recuperar su inversión en un periodo estimado de 2 a 4 años, especialmente cuando se procesan altos volúmenes diarios de fertilizante. El proyecto prueba la aplicabilidad de tecnologías de Industria 4.0 en el sector agrícola local, integrando microcontroladores, sensores e IoT. Esto abre oportunidades para futuras mejoras en mecanización, monitoreo y toma de decisiones basada en datos. Los principales desafíos para la adopción no son tecnológicos, sino económicos, organizacionales y humanos. La tecnología es viable y coherente con las tendencias globales de automatización agrícola, pero su implementación exitosa dependerá de una correcta gestión del cambio, programas de capacitación y la realización de proyectos piloto que demuestren de forma tangible sus beneficios. Por último, la dosificadora automatizada cumple con los objetivos de incrementar la eficiencia, exactitud y seguridad en la carga de fertilizantes, posicionándose como una solución alineada con la agricultura de precisión y la sustentabilidad regional. Su implementación exitosa dependerá de la adaptación a las capacidades de cada empresa y de una adecuada gestión del cambio, pero representa una alternativa prometedora para fortalecer la competitividad agrícola del norte de Sinaloa.

Otro aspecto relevante derivado del análisis es la escalabilidad tecnológica de la propuesta. Aunque el prototipo fue concebido con base en un microcontrolador Arduino por su flexibilidad y bajo costo, la arquitectura planteada permite una evolución progresiva hacia plataformas de control industrial más

robustas, como PLC y sistemas HMI certificados. Esta característica representa una ventaja estratégica, ya que facilita que empresas agrícolas de distintos tamaños adopten inicialmente una solución accesible y posteriormente la fortalezcan conforme aumenten sus requerimientos operativos, de seguridad y de integración con otros procesos productivos. En consecuencia, la propuesta no debe entenderse únicamente como un prototipo aislado, sino como la base de un sistema escalable de automatización adaptable a distintos niveles de tecnificación.

Además de los beneficios técnicos observados, la implementación de una dosificadora automatizada puede generar un impacto organizacional significativo dentro de las empresas agrícolas. La automatización del proceso no solo transforma la operación de carga, sino que también impulsa una cultura de trabajo orientada a la estandarización, el control y la toma de decisiones basada en datos. Esto favorece la profesionalización del personal, la mejora en la planeación logística y la reducción de prácticas empíricas que históricamente han limitado la eficiencia operativa. Desde esta perspectiva, la innovación propuesta contribuye a la modernización integral de la gestión agrícola, fortaleciendo la competitividad regional en un contexto donde la eficiencia, la trazabilidad y la optimización de recursos son factores cada vez más determinantes.

Finalmente, el sistema propuesto abre la posibilidad de avanzar hacia esquemas más amplios de agricultura inteligente, en los que la dosificación automatizada no sea un proceso aislado, sino parte de un ecosistema digital de monitoreo y gestión de insumos. La integración futura con bases de datos, sensores complementarios, plataformas móviles e incluso protocolos de comunicación como MQTT permitiría disponer de información en tiempo real para evaluar consumos, planificar recargas, generar históricos de operación y mejorar la trazabilidad de los fertilizantes utilizados. Esta evolución tecnológica no solo fortalecería el control operativo, sino que también tendría implicaciones favorables en términos de sostenibilidad, al promover un uso más racional de los insumos y reducir pérdidas asociadas a errores de dosificación o manejo manual ineficiente.

TRABAJO A FUTURO

El análisis de las prácticas actuales en la carga de fertilizantes sólidos en la región norte de Sinaloa evidencia la necesidad de avanzar hacia sistemas automatizados que mejoren la eficiencia, precisión y seguridad en las operaciones agrícolas. A partir del diseño de un prototipo basado en microcontrolador

Arduino y supervisado mediante aplicación móvil, se abren diversas líneas de investigación y desarrollo que pueden fortalecer la innovación tecnológica en el sector agrícola regional.

1. Optimización Técnica del Prototipo

Escalabilidad del sistema: Adaptar el prototipo para diferentes capacidades de carga y tipos de fertilizantes.

Integración de sensores avanzados: Incorporar tecnologías de visión artificial o sensores de humedad para ajustar la dosificación según condiciones del insumo.

Eficiencia energética: Evaluar el uso de energías renovables (paneles solares) para garantizar autonomía en zonas rurales.

2. Evaluación en Campo y Validación Empírica

Pruebas piloto en empresas agrícolas: Implementar el prototipo en escenarios reales para medir tiempos de carga, precisión y reducción de riesgos laborales.

Comparación con prácticas tradicionales: Documentar mejoras en productividad y ergonomía frente al manejo manual de sacos.

Análisis de costos-beneficio: Determinar la viabilidad económica de la adopción masiva del sistema.

3. Extensión hacia Ecosistemas Digitales

Plataformas de monitoreo remoto: Desarrollar aplicaciones móviles con funciones de trazabilidad y reportes automáticos.

Integración con sistemas de gestión agrícola: Conectar la dosificadora con software de planeación de cultivos y control de inventarios.

Uso de IoT y Big Data: Generar bases de datos sobre consumo de fertilizantes para análisis predictivo y optimización de recursos.

4. Impacto Social y Organizacional

Capacitación del personal agrícola: Diseñar programas de formación en el uso de tecnologías automatizadas.

Reducción de riesgos laborales: Evaluar mejoras en seguridad y salud ocupacional derivadas de la disminución de esfuerzo físico y exposición a polvo.

Cambio cultural en la adopción tecnológica: Promover la aceptación de la automatización mediante campañas de sensibilización y demostraciones prácticas.

5. Proyección Regional y Nacional

Replicación en otros cultivos y regiones: Extender el modelo a diferentes contextos agrícolas dentro y fuera de Sinaloa.

Colaboración con instituciones académicas y centros de investigación: Fortalecer la innovación mediante proyectos conjuntos.

Políticas públicas de apoyo: Impulsar programas de financiamiento y subsidios para la adopción de tecnologías de automatización en el campo mexicano.

REFERENCIAS

- Banzi, M., & Shiloh, M. (2022). *Getting started with Arduino* (4th ed.). Maker Media.
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., & Koutroulis, E. (2022). Internet of Things (IoT) in agriculture: Applications, challenges and future trends. *Sensors*, 22(7), 2678. <https://doi.org/10.3390/s22072678>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2025, mayo 20). *Tips para calibrar tu fertilizadora y mejorar tu eficiencia en campo*. <https://www.cimmyt.org/es/>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). *Datos climatológicos históricos de Sinaloa*. <https://www.gob.mx/conagua>
- Fageria, N. K. (2016). *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press.
- Groover, M. P. (2020). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). *Compendio estadístico y geográfico del estado de Sinaloa*. <https://www.inegi.org.mx/>
- Kumar, V., & Singh, A. (2020). Automation in fertilizer dispensing using microcontroller-based systems. *International Journal of Agricultural Engineering*, 13(2), 212–219.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- López, J., Ramírez, P., & Castañeda, R. (2023). Adopción de tecnologías digitales en el sector agrícola del noroeste de México. *Revista Mexicana de Innovación Agroindustrial*, 9(2), 45–57.
- Margolis, M. (2020). *Arduino cookbook* (3rd ed.). O'Reilly Media.

- Monk, S. (2019). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Nguyen, T., Skouby, K., & Lynggaard, P. (2020). Smart agriculture using IoT-related technologies and software applications. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 9(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/jsan9040045>
- Ortiz Henao, E. M., Zapata Vásquez, W. F., & Sarmiento Maldonado, H. O. (2010). Diseño de un sistema microcontrolado para la dosificación e inyección de fertilizantes en campo. *Revista Politécnica*, 6(10), 101–107. <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec>
- Patel, R., & Saraswat, S. (2021). Smart agriculture using sensor-based IoT and embedded systems. *Journal of Agricultural Informatics*, 12(1), 45–57. <https://doi.org/10.17700/jai.2021.12.1.669>
- Rani, P., Sharma, S., & Kumar, S. (2020). Precision agriculture using low-cost embedded platforms: A review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 10(4), 182–189.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2024). *Estrategias para la modernización agrícola en zonas de riego tecnificado*. <https://www.gob.mx/agricultura>
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS). (2014). *NOM-006-STPS-2014. Manejo y almacenamiento de materiales—Condiciones de seguridad y salud*. Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5349630
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10th ed.). Pearson.
- Universal Robots. (s. f.). *Industria de fertilizantes: características y uso de cobots*. <https://www.universal-robots.com>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, (153), 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- XJCSSENSOR. (2023). *Top load cell applications in agriculture and livestock*. <https://www.xjcsensor.com>

TABLA TRABAJO COLABORATIVO

Rol	Autor (es)
Director de investigación	Torres Medina José

Colaborador en la elaboración de investigación	Valenzuela Edeza Ramón
Colaborador en la elaboración de investigación	Avilés Torres Mariano de Jesús
Colaborador en la elaboración de investigación	López Nieblas Christian Marcel
Curación de datos	Torres Medina José, Avilés Torres Mariano de Jesús
Escritura - Preparación del borrador original	Valenzuela Edeza Ramón, López Nieblas Christian Marcel
Escritura - Revisión y edición	Valenzuela Edeza Ramón, López Nieblas Christian Marcel
Visualización	Torres Medina José, Avilés Torres Mariano de Jesús, Valenzuela Edeza Ramón, López Nieblas Christian Marcel
Supervisión	Torres Medina José