

Sistema de fertilización de precisión aplicado en zonas cítricas de Yucatán

Precision fertilization system applied in citrus areas of Yucatan

Orlando Adrián Chan-May^{1*} y Jimmy Josué Peña-Koo¹

¹*Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán, carretera Muna-Felipe Carrillo Puerto tramo Oxkutzcab-Akil Km. 41+400, CP 97880, Oxkutzcab, Yucatán, México.*

**Corresponding author:
ochan@suryucatan.tecnm.mx*

Resumen. Este trabajo de investigación presenta el desarrollo de un sistema de fertilización de precisión basado en tecnología de Internet de las Cosas. El componente hardware fue construido empleando el microcontrolador Raspberry Pi Pico interconectado con sensores de Nitrógeno, Potasio, Fósforo (NPK), pH, temperatura y humedad; el sistema de software de control del mismo, se desarrolló a través del lenguaje de programación MicroPython con el entorno Thonny. El objetivo principal fue analizar las características de suelos en cinco áreas de producción de citricultores del Sur de Yucatán y la correspondiente dosificación de fertilizantes para aprovechar de manera eficiente los recursos y los costos, entre 50% hasta 100% de la cantidad de cajas de cítricos producidos por árbol.

Palabras clave: Agricultura de precisión, cítricos, fertilización, Internet de las Cosas (IoT), raspberry pi.

Abstract. This paper presents the development of a precision fertilization system based on Internet of Things technology. The hardware component was built using the Raspberry Pi Pico microcontroller interconnected with Nitrogen, Potassium, Phosphorus (NPK), pH, temperature and humidity sensors; the software system control was developed with the programming language MicroPython through the integrated development environment called Thonny. The main objective for this paper was to analyze the soil characteristics in five production areas of citrus growers in the South of Yucatan and the

corresponding dosage of fertilizers to efficiently take advantage of resources and costs, between 50% and 100% of the number of citrus boxes produced by tree.

Keywords: precision agriculture, citrus, fertilization, Internet of Things (IoT), raspberry pi.

I. INTRODUCCIÓN

La citricultura, al igual que otras áreas, ha evolucionado con el paso del tiempo como consecuencia de los avances tecnológicos. Los citricultores siempre están en búsqueda de mejores procesos para incrementar el rendimiento de sus áreas de siembra, reducir costos de producción y obtener mejores ganancias, por lo que sin duda, automatizar sus procesos es algo inevitable. En el sur del Estado de Yucatán, se concentran gran número de productores de limón, naranja y toronja con sus variantes, quienes están adoptando una cultura de mejora continua. Un método que está tomando importancia, para optimizar las unidades cítricas es la Agricultura de Precisión (AP), que agrupa un conjunto de tecnologías aplicables en la producción agraria, su factor común es la toma de decisiones y su posterior ejecución (Rambauth, 2022). Introducir tecnologías de información y comunicación en la agricultura, permite hacerla más eficiente y reducir costos, aumenta la producción conociendo y monitorizando constantemente el estado del suelo, especialmente los nutrientes y la humedad, para responder inmediatamente a sus necesidades (Caicedo, Lara, Morales y Flores, 2024).

De manera tradicional, los citricultores de esta zona de Yucatán, emplean fertilizantes de origen animal, entre los que destacan la pollinaza y la gallinaza, DAP y UREA. Sin embargo, en la mayoría de los casos, las cantidades que aplican los citricultores no contienen los minerales adecuados, debido a los tipos de suelos. Por consiguiente, estas unidades agrícolas se convierten en áreas de oportunidad para usar tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT), para lograr una fertilización de precisión, que contribuya de manera sistemática al aprovechamiento correcto de los plantíos, dosificar la cantidad de fertilizantes y sus minerales adecuadamente y, mejorar la fertilidad de las plantas, para lograr el aumento en la productividad. RP2040 es un microcontrolador de Raspberry Pi que aporta características de alto rendimiento, bajo costo, y facilidad de uso (Serrano y Sandoval, 2023).

La tasa de mineralización de nitrógeno (N) en el suelo ha sido considerada un factor clave para los cálculos de dosis de aplicación de abonos o fertilizantes orgánicos para una agricultura rentable (Flores, Mendoza y Ogaz, 2023). Considerando lo anterior, este estudio tiene como objetivo desarrollar un prototipo de fertilización de precisión a través de tecnología basada en IoT para monitoreo de propiedades de los suelos y dosificación de minerales para el correcto cultivo de cítricos en el Sur de Yucatán. El prototipo de fertilización de precisión fue desarrollado con la placa electrónica Raspberry pi pico para aplicaciones de IoT, interconectada con sensores de minerales NPK, humedad, pH y otros para análisis de suelos.

II. METODOLOGÍA

El trabajo de investigación se realizó con las etapas principales que se presentan en la figura 1 y, los materiales que se mencionan a continuación.



Figura 1. Metodología para desarrollo de sistema de fertilización de precisión. Fuente: Elaboración propia.

Etapa 1. Visitas a citricultores. Se visitaron zonas o parcelas de siembra de cítricos con productores de la región para conocer sus métodos de fertilización, los tipos de fertilizantes y los principales compuestos que aplican, la dosis y la época de aplicación para nutrir las plantas y, la estructura y distribución de sus sistemas de riego.

En cada parcela o unidad agrícola de la zona, se realizaron entrevistas con los citricultores relacionadas con sus métodos tradicionales y comunes de dispersión de los tipos de fertilizantes, las cantidades y las formas de aplicación de estos nutrientes para optimizar su producción de cítricos. En estas conversaciones, se

obtuvieron los principales fertilizantes (Tabla 1), que ellos utilizan por los minerales que los componen.

Tabla 1. Principales fertilizantes aplicados por citricultores del sur de Yucatán.

Fuente: Elaboración propia.

Fertilizante	Nutrientes sobresalientes
Pollinaza/ Gallinaza	Calcio, Fósforo, Magnesio, Sodio, Potasio, Zinc
Urea	Nitrógeno
Dap	Fósforo, nitrógeno

Etapa 2. Análisis y definición de minerales para fertilización. Las principales fuentes de nutrimentos de los cultivos están en los fertilizantes químicos, los biofertilizantes y los abonos orgánicos. En esta fase se obtuvieron registros de las principales fuentes de nutrimentos que los citricultores aplican a través de los fertilizantes más utilizados, ya sean de origen químico como el DAP y la UREA y, los abonos orgánicos como la pollinaza y la gallinaza.

La identificación de la deficiencia de nutrientes es fácil en algunos casos, pero difícil en otros. La razón de ello es que los síntomas de deficiencia de dos nutrientes diferentes pueden ser casi idénticos. Además, se debe de tener cuidado de no confundir los signos de carencia con virus o síntomas de enfermedades o daños causados por los insectos. En la tabla 2, se presentan los signos más visibles de deficiencia de nitrógeno y fósforo (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

Tabla 2. Deficiencias de nitrógeno y fósforo en plantas.

Fuente: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Fuente: Elaboración propia.

Deficiencia de Nitrógeno	Deficiencia de Fósforo
Plantas de crecimiento retrasado, plantas poco saludables y pequeñas.	Hojas verdes oscuras azuladas, moradas y parduscas a partir de la punta y, en los tallos.
Pérdida del color verde, decoloración amarillenta de las hojas, viejas hojas parduscas.	Crecimiento retrasado. Plantas lentas a madurar, permaneciendo verdes.
Las hojas más bajas pueden morir prematuramente mientras la cima de la planta permanece verde.	Los frutos pueden ser deformados, los granos pobremente rellenos

También, se definieron otros elementos para el proceso de fertilización, como el tipo de suelo y la forma del terreno, que de alguna manera intervienen en una buena producción de cítricos. Además, en esta etapa se obtuvieron las cantidades de fertilizantes (datos cuantitativos) que los citricultores aplican a las plantas de acuerdo a su tamaño, profundidad del suelo y otros factores.

Etapa 3. Construcción de prototipo hardware. En la tercera etapa se diseñó y construyó el prototipo del sistema de fertilización de precisión con enfoque de IoT, mediante la placa electrónica Raspberry Pi Pico y los sensores de humedad, pH y los principales minerales detectados en la etapa anterior: nitrógeno, fósforo y, potasio.

La circuitería tuvo como objetivo el sensado de las variables para la dosificación adecuada de los principales minerales que las plantas absorben y aquellos elementos que se distribuyen en el suelo, para una mejor absorción en las plantas de cítricos.

El microcontrolador Raspberry Pi Pico (Figura 2), es uno de los microcontroladores más baratos. Puede ejecutar programas en lenguaje Micropython y C. Tiene el chip RP2040 el cual tiene las siguientes características: memoria flash de 2 MB, puerto micro USB, 26 pines GPIO y RAM de 264 KB (Pranay, 2021).

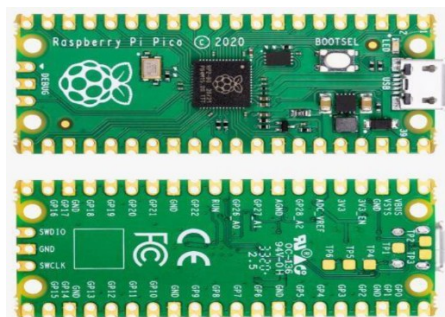


Figura 2. Microcontrolador Raspberry Pi Pico RP2040. Fuente: Pranay (2021).

Los sensores RS-NPK-N01-TR, RS-ECTHPH-N01-TR-1, que se presentan en la figura 3, se utilizan en AP. El primero, es adecuado para detectar el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo, y determinar su fertilidad. Se puede enterrar en el suelo durante mucho tiempo, por ser resistente. El segundo, es una herramienta importante en la agricultura para observar y estudiar de manera integrada nutrientes del suelo, puede medir la conductividad eléctrica, los elementos de pH, temperatura y, humedad. Se puede utilizar para mediciones estables y a largo plazo de las condiciones del suelo en un área fija a un precio económico (Renke, 2024).



Figura 3. Sensores RS-NPK-N01-TR, RS-ECTHPH-N01-TR-1 Fuente: Renke (2024).

Etapa 4. Desarrollo de software de control. Como última etapa en el desarrollo del sistema de fertilización de precisión se desarrollaron los módulos de los programas a través del lenguaje de programación MicroPython en el entorno de desarrollo Thonny, considerando todos los minerales que las plantas requieren así como la cantidad y la distribución adecuada de éstos, para evitar el desperdicio de los fertilizantes y por consiguiente, tener un sistema IoT que permita el sensado de las necesidades de las plantas y se tenga una respuesta en tiempo real, con la finalidad de tener buenos frutos. En la figura 5, se puede ver un fragmento del código de sensado de los datos de nitrógeno, fósforo y potasio.

```

36 while True:
37     tim_ready=1
38
39     #Esperando que se reciban datos
40     while(uart0.any()<1):
41         pass
42
43     #Se reciben datos
44     while(uart0.any())>0):
45         RxData.append(uart0.read(1))
46         index+=1
47
48     #mientras los datos son recibidos
49     if index==11:
50         #Checar datos recibidos
51         print("Recepción de datos:"+str(RxData))
52
53         #Convertir datos recibidos a valores NPK
54         N=((int.from_bytes(RxData[3], 'big'))<<8)+(int.from_bytes(RxData[4], 'big'))
55         P=((int.from_bytes(RxData[5], 'big'))<<8)+(int.from_bytes(RxData[6], 'big'))
56         K=((int.from_bytes(RxData[7], 'big'))<<8)+(int.from_bytes(RxData[8], 'big'))
57
58         #Desplegar valores NPK
59         print("Nitrógeno:"+str(N))
60         print("Fósforo:"+str(P))
61         print("Potasio:"+str(K))

```

Figura 5. Código MicroPython sensor NPK Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS

A partir de la visita a las unidades de producción citrícolas y realizar entrevistas abiertas y dirigidas, se identificaron las costumbres y técnicas tradicionales empleadas por los productores de cítricos de la región, relacionadas con el abono y la fertilización de sus árboles con el propósito de mejorar sus procesos de producción, tanto en cantidad como en calidad. Algunos productores tienen los recursos económicos para la fertilización adecuada de manera constante de sus árboles, por el contrario, varios esperan el apoyo gubernamental para la obtención de fertilizantes.

Considerando lo anterior se realizaron muestras de las cantidades de minerales en ambos tipos de parcelas, con el objetivo de nivelar los nutrientes de un área que tiene menor producción con respecto a los de mejor producción y calidad. De esta manera, el prototipo se implementó durante tres meses, para identificar los niveles de nutrientes en los suelos de cinco unidades agrícolas de la zona. Las plantas de limón persa con nutrientes adecuados producen tres cajas de 20-25 kg por árbol/cosecha, mientras que los que carecen de las cantidades adecuadas producen de 1 hasta 2 cajas. Por otra parte, se realizó una revisión sistemática relacionada con el análisis de suelos agrícolas, específicamente para identificar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, indispensable para la toma de decisiones para conseguir los objetivos de cosecha o aportar lo necesario y suficiente sin encarecer la producción.

En respuesta a estas dos acciones se realizó un análisis de sensores y placas programables compatibles entre sí, para lectura de macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio) y micronutrientes (hierro, boro, manganeso, cinc, molibdeno y cobre).

La tarjeta de desarrollo empleada fue Raspberry Pi Pico RP2040, en interconexión con el sensor de suelo RS-NPK-N01-TR identificado como componente esencial para el diseño del prototipo. El segundo sensor de tierra seleccionado fue RS-ECTHPH-N01-TR-1. Ambos sensores, permiten detectar el contenido de tres macronutrientes para las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio; e identificar humedad del suelo, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

Estos sensores de suelo son controlados con el módulo RS485, el cual está definido como un sistema de comunicación en bus diferencial multipunto. Trabaja como una comunicación serial, con los pines RX y TX de la placa RP2040 alimentado con 3.3 V, transmitiendo datos por los pines A y B.

Para dar paso al tratamiento del suelo, el cual es aplicado por el mismo sistema de riego, se emplearon válvulas solenoide controladas por corriente eléctrica. Estas electroválvulas contienen un electroimán el cual se energiza para crear un campo magnético que mueve un émbolo, este movimiento abre o cierra la válvula, permitiendo o no el flujo del riego con nutrientes a través de ellas.

El control de todo el hardware fue programado con MicroPython, una implementación sencilla y eficiente de Python 3, optimizado para ejecutarse en microcontroladores y en entornos restringidos.

El desarrollo del prototipo, permite realizar pruebas del suelo, cultivo de plantas y agricultura de precisión.

IV. DISCUSIÓN

Los fertilizantes deben resguardarse en lugares secos, sin exposición directa del sol o la lluvia, antes de la aplicación para que no pierdan sus minerales óptimos, ésta recomendación aplica para fertilización manual o automática.

La agricultura de precisión es un proceso sistematizado de la actividad agrícola que proporciona elementos tecnológicos como: sistemas de control, sensores, hardware, telemática y software, lo que les da opciones a los agricultores para implementar procesos en sus cultivos mediante tecnologías, alcanzando competitividad en sus procesos y así lograr competir con productores mundiales (Simanca, Páez, Díaz y Palacio, 2023).

La tarjeta de desarrollo Raspberry Pi Pico RP2040, permite el desarrollo de arquitecturas de fertilización de precisión por ser una plataforma de desarrollo flexible de bajo costo, permitiendo almacenar diferentes aplicaciones de acuerdo al escenario de prueba o implementación. A través de los datos obtenidos por medio de los sensores de suelos, se puede indicar la reacción del suelo, pudiendo ser ácida o alcalina, lo cual apoya a la predicción de la disponibilidad que tendrán en la solución de suelo elementos como el fósforo y los micronutrientes, muy sensibles a variaciones en este factor. Con la conductividad eléctrica, se identifica la salinidad del terreno, para saber si el cultivo a plantar es tolerante al suelo o se debe aplicar abono y riego para conseguir mejores resultados.

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló un prototipo basado en tecnología IoT, para el sensado de variables que afectan las características del suelo con el objetivo principal de dosificar adecuadamente los minerales nutrientes de las plantas de cítricos para obtener mejores rendimientos. Asimismo, determina componentes como el pH, la humedad y los valores de nitrógeno y otros elementos, para identificar el momento y la dosis correcta de fertilizante para aplicarla a las plantas cuando éstas la necesiten, lo que se traduce en mejores productos y eficiencia en los costos. En términos monetarios sin la implementación de un sistema de agricultura de precisión, se reduce entre 33% y 66% los ingresos percibidos por los productores de la región.

Los conjuntos de datos obtenidos en este trabajo de investigación, se pretenden emplear en el desarrollo de sistemas de aprendizaje automático, para predicción y toma de decisiones.

REFERENCIAS

Caicedo, L.; Lara, G.; Morales, K. y Flores, J. (2024). Sensores electrónicos en la agricultura de precisión. Ideas

en Ciencias de la Ingeniería, 2(1) 4-16. Recuperado de <https://ideasencienciasingenieria.uaemex.mx/article/view/22176>

Flores, J.; Mendoza, G. y Ogaz, A. (2023). Efecto de fertilizantes orgánicos en la mineralización de nitrógeno. Propiedades del suelo y procesos. Recuperado de https://www.smcsmx.org/files/2023/LIBRO_2_2023.pdf

Pranay, T. (2021). Low-cost home automation system using Raspberry Pi Pico microcontroller. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 8(11), 718-722. Recuperado de: <https://www.irjet.net/archives/V8/i11/IRJET-V8I11120.pdf>

Rambauth, G. (2022). Agricultura de Precisión: La integración de las TIC en la producción Agrícola. Journal of Computer and Electronic Science, Theory and Applications, 3(1), 34-38. Recuperado de <https://doi.org/10.17981/cesta.03.01.2022.04>

Renke Technology (2024). RS-ECTH-N01 Conductivity soil temperature moisture three-in-one sensor 485 type instruction manual. Recuperado de <https://www.imiconsystem.com/wp-content/uploads/2020/10/Conductivity-soil-temperature-moisture-three-in-one-sensor-485-type-instruction-manual.pdf>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023. Sácale provecho a tus fertilizantes. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/sacale-provecho-a-tus-fertilizantes?idiom=es>

Simanca, F.; Páez, J.; Díaz, E. y Palacio, J. (2023). La agricultura de precisión y herramientas TIC de apoyo. Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. Recuperado de <https://doi.org/10.16925/9789587604153>

Serrano, E. y Sandoval, M. (2023). Sistema electrónico de bajo costo para monitoreo de déficit de presión de vapor y luz solar utilizando una tarjeta Raspberry Pi Pico. Investigium. 8(16), 7-16. Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/investigium/article/view/9651/985>