



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,
Volumen 9, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6

IMPLEMENTACIÓN DE SENSOR DE MINERALES NPK COMO APOYO PARA EL CULTIVO EN UNA COMUNIDAD MAYA DEL ESTADO DE YUCATÁN

**IMPLEMENTATION OF AN NPK MINERAL SENSOR AS
SUPPORT FOR CROP CULTIVATION IN A MAYAN
COMMUNITY OF THE STATE OF YUCATÁN**

Mario Rodolfo Chan Chi
Tecnológico Nacional de México, México

Janet Guadalupe Pech de la Portilla
Tecnológico Nacional de México, México

Carlos Humberto López May
Tecnológico Nacional de México, México

Andrea Guadalupe Vela Peraza
Tecnológico Nacional de México, México

Markcus Josue Kam Pacheco
Tecnológico Nacional de México, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21439

Implementación de Sensor de Minerales NPK como Apoyo para el Cultivo en una Comunidad Maya del Estado de Yucatán

Mario Rodolfo Chan Chi¹

mario.cc@conkal.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0006-4301-1406>

Tecnológico Nacional de México
Campus Conkal
México

Carlos Humberto López May

carlos.lm@conkal.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0005-8777-992X>

Tecnológico Nacional de México
Campus Conkal
México

Markcus Josue Kam Pacheco

L21800314@conkal.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0005-7937-5263>

Tecnológico Nacional de México
Campus Conkal
México

Janet Guadalupe Pech de la Portilla

janet.pd@conkal.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-1035-5054>

Tecnológico Nacional de México
Campus Conkal
México

Andrea Guadalupe Vela Peraza

L21800136@conkal.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0007-2864-064X>

Estudiante
Tecnológico Nacional de México
Campus Conkal
México

¹ Autor principal

Correspondencia: mario.cc@conkal.tecnm.mx

RESUMEN

El presente artículo describe la implementación de un sensor de minerales (NPK), como una estrategia tecnológica orientada a evaluar la salud del suelo, siendo este un factor crítico para la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. La incorporación de sensores NPK en el sistema automatizado permitió monitorear la salud del suelo mediante la medición de sus principales macronutrientes —nitrógeno, fósforo y potasio—, parámetros esenciales para diagnosticar su fertilidad y balance nutricional. Además, su uso en el huerto escolar de la Secundaria Técnica No. 13 del municipio de Acanceh, Yucatán, fomentó el aprendizaje práctico sobre la conservación de suelos y el uso responsable de los recursos naturales. El proyecto se basa en el desarrollo de un sensor NPK JXCT-IoT, el cual está diseñado para detectar el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo, determinar la fertilidad del suelo y facilitar la evaluación del estado del suelo por parte del sistema del cliente, un módulo LoRa para comunicación inalámbrica y un Microcontrolador (ESP32). El estudio adopta una metodología mixta, combinando observación, entrevistas y pruebas de campo en el huerto escolar, para la parte cualitativa y las mediciones realizadas arrojadas por el sensor nos otorgan la parte cuantitativa de esta investigación. Los resultados obtenidos al tener la medición de los parámetros del suelo de manera continua e inalámbrica proporcionaron información valiosa sobre las condiciones del suelo, permitiendo prácticas de agricultura de precisión que optimizan el uso de agua, mejorando significativamente la eficiencia del riego, reducción del desperdicio de agua y optimización de los nutrientes del suelo, además de impactos positivos en la seguridad alimentaria, sostenibilidad ambiental y formación tecnológica de los estudiantes participantes. Es importante señalar que esta investigación contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el agua limpia, energía asequible y autosuficiencia alimentaria en contextos rurales.

Palabras clave: sensor npk, conductividad eléctrica (ec), ph del suelo, nutrientes (n, p, k), monitoreo agrícola

*Artículo recibido 20 octubre 2025
Aceptado para publicación: 15 noviembre 2025*



Implementation of an NPK Mineral Sensor as Support for Crop Cultivation in a Mayan Community of the State of Yucatán

ABSTRACT

This article describes the implementation of a mineral sensor (NPK) as a technological strategy aimed at assessing soil health, which is a critical factor for agricultural productivity and environmental sustainability. The incorporation of NPK sensors into the automated system allowed for monitoring soil health through the measurement of its main macronutrients—nitrogen, phosphorus, and potassium—essential parameters for diagnosing soil fertility and nutritional balance. Moreover, its use in the school garden of Technical Secondary School No. 13 in the municipality of Acanceh, Yucatán, promoted practical learning on soil conservation and the responsible use of natural resources. The project is based on the development of a JXCT-IoT NPK sensor, designed to detect the nitrogen, phosphorus, and potassium content in the soil, determine soil fertility, and facilitate soil condition assessment through the client system, a LoRa module for wireless communication, and a microcontroller (ESP32). The study adopts a mixed methodology, combining observation, interviews, and field tests in the school garden for the qualitative component, while the measurements provided by the sensor constitute the quantitative part of this research. The results obtained from continuous and wireless monitoring of soil parameters provided valuable information on soil conditions, enabling precision agriculture practices that optimize water use, significantly improving irrigation efficiency, reducing water waste, and optimizing soil nutrients. Additionally, these practices had positive impacts on food security, environmental sustainability, and the technological training of participating students. It is important to highlight that this research contributes to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs) related to clean water, affordable energy, and food self-sufficiency in rural contexts.

Keywords: npk sensor, electrical conductivity (ec), soil ph, nutrients (n, p, k), agricultural monitoring



INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos naturales más valiosos para la humanidad, pues constituye la base de los ecosistemas terrestres y de la producción agrícola. Su degradación por prácticas inadecuadas, sobreexplotación o el uso excesivo de fertilizantes representa una amenaza directa para la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental (FAO, 2021). En este contexto, la evaluación constante de la salud del suelo se ha convertido en una prioridad dentro de la agricultura sostenible, ya que permite comprender los procesos físicos, químicos y biológicos que determinan su fertilidad y capacidad productiva (Jiménez et al., 2022).

La Península de Yucatán enfrenta actualmente una reducción significativa en la disponibilidad de agua, estimada en un 59 % según informes recientes (Forbes México, 2024), lo que resalta la urgencia de adoptar prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles. Esta problemática regional subraya la necesidad de tecnologías que permitan un manejo racional de los recursos hídricos y edáficos, asegurando la productividad sin comprometer la integridad ambiental.

La agricultura de precisión, impulsada por el desarrollo de tecnologías digitales y de sensorización, ofrece nuevas herramientas para el monitoreo continuo de parámetros clave del suelo. Entre ellas, los sensores de NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) permiten medir en tiempo real la disponibilidad de los principales macronutrientes que intervienen en el crecimiento vegetal, proporcionando información confiable para el diagnóstico de la fertilidad y el balance nutricional del suelo (Cruz & López, 2020). Esta información resulta esencial para ajustar la aplicación de fertilizantes, prevenir la degradación del suelo y optimizar el uso del agua, contribuyendo a una producción más eficiente y ambientalmente responsable (Rodríguez et al., 2023).

En el ámbito educativo, la incorporación de este tipo de tecnologías en espacios formativos como los huertos escolares ofrece oportunidades significativas para integrar la enseñanza de la ciencia, la tecnología y el cuidado ambiental. Los estudiantes no solo adquieren habilidades en electrónica y programación, sino también una comprensión práctica de los procesos agroecológicos que sustentan la vida y la producción de alimentos. De esta manera, los huertos escolares se convierten en escenarios vivos para la enseñanza de la sostenibilidad y la innovación tecnológica con pertinencia local (Hernández & Pérez, 2021).



El presente proyecto se desarrolló en el huerto escolar de la Secundaria Técnica No. 13 del municipio de Acanceh, Yucatán, así como un huerto en el municipio de Oxfutzcab, donde se implementó un sensor NPK JXCT-IoT, diseñado para detectar el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo y determinar su fertilidad. Este sistema, complementado con un módulo LoRa para comunicación inalámbrica y un microcontrolador ESP32, permitió la transmisión de datos a distancia y el análisis continuo de las condiciones del suelo. La integración de estas tecnologías en un entorno educativo rural responde a la necesidad de promover una agricultura de precisión accesible, basada en principios de innovación y sostenibilidad.

Metodológicamente, el estudio adoptó un enfoque mixto, combinando observación, entrevistas y pruebas de campo para evaluar los aspectos cualitativos relacionados con la experiencia educativa y el uso del sistema, junto con mediciones cuantitativas obtenidas a partir de los datos del sensor NPK. Este enfoque integral permitió analizar no solo el desempeño técnico del sistema, sino también su impacto en la formación tecnológica y ambiental de los estudiantes.

Los resultados derivados de la implementación mostraron que la medición continua e inalámbrica de los parámetros del suelo aporta información valiosa para la toma de decisiones agrícolas, posibilitando prácticas de agricultura de precisión que optimizan el uso de agua y nutrientes. Asimismo, el proyecto promovió la participación activa de la comunidad escolar en el monitoreo ambiental y la gestión sostenible del huerto, generando aprendizajes significativos y fortaleciendo la conciencia ecológica de los participantes.

En conjunto, esta investigación contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 2 (Hambre cero), el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento), el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables), al vincular la educación, la tecnología y la sostenibilidad en un modelo replicable de innovación escolar.

METODOLOGÍA

El presente estudio adoptó una metodología mixta con un diseño aplicado y experimental, integrando técnicas cuantitativas y cualitativas para evaluar el desempeño técnico del sensor NPK y su impacto formativo en el contexto del huerto escolar.



Figura 1: Vista del invernadero donde se cultiva.



Figura 2: Vista panorámica del invernadero donde se realiza la siembra del huerto escolar.



La parte cuantitativa se centró en la recolección y análisis de datos provenientes del sensor NPK JXCT-IoT, mientras que la parte cualitativa se enfocó en la observación directa, entrevistas y registro de experiencias de los participantes durante la implementación del sistema. Este enfoque permitió obtener una comprensión integral tanto de los resultados técnicos como de los efectos educativos y ambientales del proyecto.

Lugar de estudio

El proyecto se llevó a cabo en el huerto escolar de la Secundaria Técnica No. 13, ubicada en el municipio de Acanceh, Yucatán, México. El huerto cuenta con una superficie aproximada de 80 m² destinada al cultivo de hortalizas, chile habanero, así como un espacio para cítricos. Este espacio se seleccionó por su representatividad como entorno educativo rural y por las condiciones locales de suelo calcáreo con limitaciones hídricas, características comunes en la región peninsular. Cabe señalar que se hicieron otras mediciones en otras áreas que se desea cultivar; que actualmente están rehabilitando para aprovechar también el prototipo de riego que se instalará. A continuación se muestran algunas imágenes alusivas al área experimental de los sembradíos. En la figura 1 se puede observar una imagen del área del invernadero construido en la secundaria, así como otras áreas que se desean habilitar en un futuro cercano para sembrar. En la figura 2 se observa una vista panorámica del invernadero implementado y la participación de los estudiantes.

Instrumentación y componentes tecnológicos.

El sistema diseñado integró tres componentes principales:

1. Sensor NPK JXCT-IoT: dispositivo capacitivo de tres electrodos empleado para medir en tiempo real las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) del suelo. Estos parámetros permitieron determinar la fertilidad y balance nutricional del sustrato.
2. Microcontrolador ESP32: unidad de procesamiento responsable de la adquisición, almacenamiento y envío de datos, programada mediante el entorno de desarrollo Arduino IDE.
3. Módulo de comunicación LoRa (Long Range): encargado de la transmisión inalámbrica de los datos desde el punto de medición hacia una estación receptora, permitiendo monitoreo a distancia con bajo consumo energético.

El sistema operó con alimentación eléctrica de corriente continua (5 V) y se complementó con una pantalla LCD y una interfaz web básica para la visualización de los valores capturados por el sensor.

En la tabla 1 podemos observar las partes que componen al sensor NPK.

Tabla 1: Componentes del Sensor NPK

Componentes	Descripción
Microcontrolador	ESP32, por su capacidad de procesamiento y bajo costo
Sensor NPK	Sensor NPK JXCT-IoT (para N, P, K), sensor de humedad y temperatura del suelo, sensor de pH y conductividad eléctrica (EC).
Módulo de comunicación	Módulo LoRa, para transmisión de largo alcance.
Transistores	Para amplificar señales.
Pines de conexión	GND, RXD, TXD.
Fuente de energía	Batería LiPo.
Placas	Materiales para la realización de placas.
Cables	Cables de conexión.

Procedimiento experimental

El desarrollo metodológico se estructuró en seis fases principales:



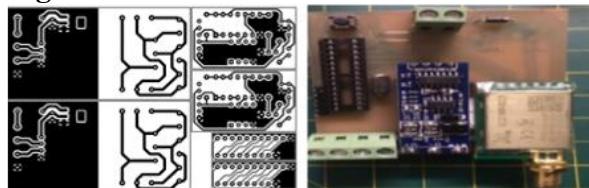
Diseño e integración del sistema: Selección de componentes, diseño del circuito electrónico y programación del microcontrolador para el registro periódico de datos (cada 10 min). En la figura 3 se muestra la integración del sensor NPK.

Figura 4: Calibración del Sensor NPK.



Instalación y calibración: el sensor NPK se colocó a una profundidad de 15 cm en una zona representativa del huerto. Se realizó una calibración inicial contrastando las lecturas con muestras de suelo analizadas en laboratorio para validar la precisión de los datos. En la figura 4 se muestra la calibración del sensor NPK para llevar a cabo las mediciones en el huerto escolar.

Figura 3: Sensor NPK.



Monitoreo y registro: durante un periodo de cuatro semanas, se efectuaron mediciones continuas de N, P y K, junto con observaciones sobre humedad y temperatura del suelo. Para la lectura del sensor se presenta la tabla 2 donde se indican las variables que arroja el sensor NPK.

Tabla 2. Variables utilizadas por el sensor.

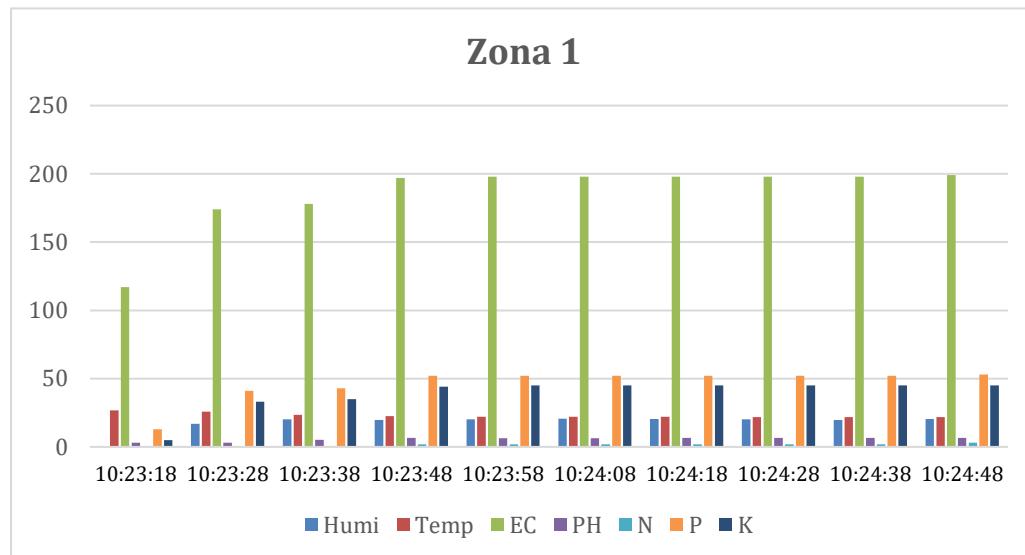
Variable	Descripción	Unidad aproximada
Humi	Humedad del suelo	%
Temp	Temperatura del suelo	°C
EC	Conductividad eléctrica (indicador de sales y nutrientes disueltos)	µS/cm
pH	Nivel de acidez/alcalinidad del suelo	Escala 0–14
N, P, K	Concentraciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio mg/kg o ppm (según calibración del sensor)	

En la tabla 3 se muestra la información obtenida durante las pruebas de campo al sensor NPK el 11 de marzo. En la figura 5 se representan estos datos obtenidos. Este conjunto de datos provenientes del sensor NPK JXCT-IoT permite hacer una interpretación técnica muy útil sobre las condiciones del suelo y la efectividad del monitoreo automatizado.

Tabla 3: Datos obtenidos del sensor NPK en la segunda semana de marzo.

history data is exported only for reference.									
Export time:2025/03/11									
date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K	
11/03/25	10:23:18	0	26.8	117	3	0	13	5	
11/03/25	10:23:28	16.9	25.9	174	3	0	41	33	
11/03/25	10:23:38	20.1	23.4	178	5.2	0	43	35	
11/03/25	10:23:48	19.8	22.5	197	6.6	2	52	44	
11/03/25	10:23:58	20.3	22.1	198	6.4	2	52	45	
11/03/25	10:24:08	20.7	22	198	6.4	2	52	45	
11/03/25	10:24:18	20.5	22	198	6.5	2	52	45	
11/03/25	10:24:28	20.3	21.9	198	6.5	2	52	45	
11/03/25	10:24:38	19.8	21.9	198	6.5	2	52	45	
11/03/25	10:24:48	20.5	21.9	199	6.6	3	53	45	

Figura 5: Variación del día 11/03/2025 de parámetros del suelo medidos por el sensor NPK JXCT-IoT.



Evaluación participativa: Se realizaron sesiones de trabajo con estudiantes tanto de la secundaria técnica como con estudiantes de la carrera de Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones del TecNM-Instituto Tecnológico de Conkal, también se trabajó con el docente responsable del huerto de la secundaria para la interpretación de resultados, reflexionando sobre las



condiciones del suelo, la gestión del agua y la importancia de conservar los recursos naturales. En la figura 6 se observa la evaluación participativa entre los estudiantes de la secundaria técnica y los estudiantes del TecNM. En la figura 7 se observa al sensor haciendo mediciones en el huerto escolar

Figura 6: Evaluación participativa de los estudiantes.



Figura 7: Medición en el huerto escolar



Recolección y análisis de datos.

Los datos cuantitativos obtenidos del sensor fueron exportados en formato CSV y procesados mediante Microsoft Excel para generar promedios, desviaciones estándar y gráficos de variación de nutrientes. Los datos cualitativos provenientes de entrevistas y observaciones se analizaron mediante codificación temática, identificando percepciones sobre la utilidad del sistema, el aprendizaje adquirido y las prácticas sostenibles generadas.

Criterios éticos y de validación

El estudio se desarrolló bajo principios de ética educativa y científica. Se obtuvo autorización de la dirección escolar y consentimiento informado de los docentes y estudiantes participantes. La validez del sistema se garantizó mediante pruebas de calibración cruzada y repetición de lecturas para reducir errores instrumentales. Asimismo, la confiabilidad de los resultados se fortaleció mediante la triangulación metodológica entre las fuentes de datos técnicas y las experiencias observadas.

En resumen, esta metodología integró la combinación de herramientas tecnológicas, mediciones automatizadas e interacción educativa permitió no solo validar la eficiencia del sensor NPK en la determinación de la salud del suelo, sino también generar un modelo de aprendizaje aplicado que promueve la sostenibilidad ambiental y el desarrollo de competencias tecnológicas en contextos escolares rurales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante cinco semanas consecutivas se realizaron mediciones del suelo en el huerto escolar utilizando el sensor NPK JXCT-IoT integrado al sistema de monitoreo automatizado. Las variables analizadas fueron humedad (Humi), temperatura (Temp), conductividad eléctrica (EC), pH, y las concentraciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Cada conjunto de datos correspondió a un muestreo semanal, registrando diez lecturas continuas por sesión.

Comportamiento general del suelo

Los resultados evidenciaron variaciones progresivas en las condiciones físico-químicas del suelo, asociadas a factores de humedad ambiental, manejo del riego y procesos de fertilización natural del huerto.

- En la primera semana, el pH pasó de 3.0 a 6.6 conforme el sensor se estabilizó, mostrando un suelo ligeramente ácido con temperatura promedio de 22.4 °C y humedad cercana al 20 %. Los valores de N (2 ppm), P (52 ppm) y K (45 ppm) indican fertilidad media, con deficiencia relativa de nitrógeno.
- En la segunda semana, la humedad aumentó ($\approx 23 \%$), el pH se mantuvo entre 7.1 y 7.6, y los nutrientes N, P y K alcanzaron 9 ppm, 68 ppm y 60 ppm, respectivamente, reflejando una mejora



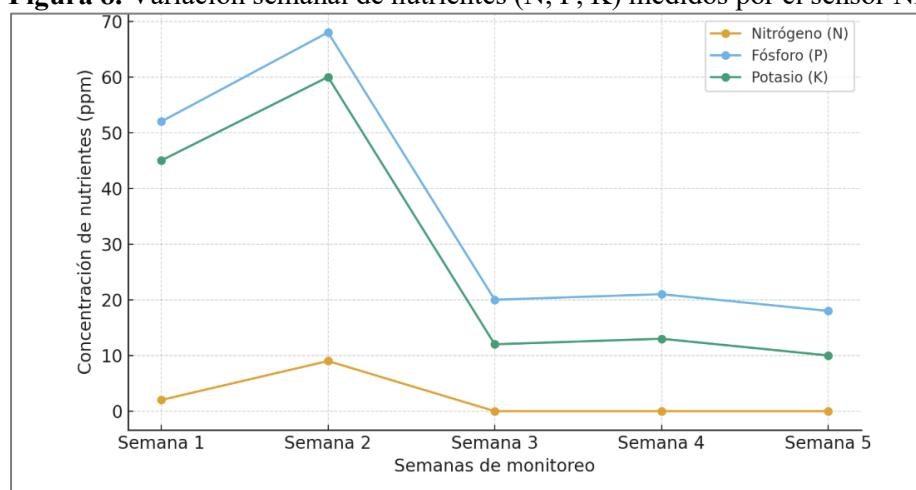
significativa en la disponibilidad de macronutrientes, posiblemente por efecto del riego y el movimiento de nutrientes en el perfil del suelo.

- En la tercera semana, la humedad disminuyó a 11 %, con temperatura de 21 °C y pH promedio de 6.6. Las lecturas de N (0 ppm), P (20 ppm) y K (12 ppm) evidenciaron una reducción marcada de nutrientes, asociada probablemente al consumo de las plantas o a lixiviación por riego previo.
- En la cuarta semana, los valores de pH se estabilizaron entre 7.2 y 7.3, la temperatura alcanzó 25 °C y el nitrógeno se mantuvo en 0 ppm, mientras que fósforo y potasio mostraron leves incrementos (21 ppm y 13 ppm). Esto sugiere una recuperación parcial del suelo posterior al ajuste del régimen de riego.
- Finalmente, en la quinta semana, el pH aumentó hasta 8.5–8.6, indicando un suelo alcalino, con humedad de solo 8 % y baja concentración de nutrientes (P = 18 ppm, K = 10 ppm). Esta condición refleja una pérdida de fertilidad y posible efecto de sequedad, lo que resalta la importancia del monitoreo continuo para regular la humedad y el balance químico.

Análisis comparativo de las mediciones.

Al comparar las cinco series temporales mostradas en la figura 8, se observa una tendencia ascendente inicial de nutrientes (semanas 1–2) seguida de una disminución progresiva (semanas 3–5).

Figura 8. Variación semanal de nutrientes (N, P, K) medidos por el sensor NPK JXCT-IoT



El pH del suelo mostró una transición de ácido (≈ 6) hacia ligeramente alcalino (≈ 8.5), probablemente influenciada por la evaporación de agua y la concentración de sales.

La conductividad eléctrica aumentó gradualmente de 117 µS/cm a 230 µS/cm en las dos primeras semanas, confirmando el enriquecimiento del suelo, y posteriormente disminuyó en los últimos registros por pérdida de humedad.

Estos resultados validan la sensibilidad del sensor NPK JXCT-IoT para detectar variaciones semanales en la composición del suelo, permitiendo tomar decisiones preventivas sobre riego, abonado y manejo del pH.

Implicaciones agronómicas y educativas.

Desde el punto de vista agronómico, el seguimiento de los valores de NPK permitió identificar los momentos de mayor déficit de nitrógeno, lo que sugiere incorporar abonos orgánicos ricos en N para mantener la productividad del huerto. A nivel educativo, los datos obtenidos fomentaron en los estudiantes la interpretación de variables ambientales, fortaleciendo su comprensión del concepto de salud del suelo y su relación con la sostenibilidad.

Los resultados también evidencian que la integración de sensores IoT en espacios escolares es una herramienta de aprendizaje experimental que conecta la ciencia con la práctica agrícola local, contribuyendo a la formación de competencias tecnológicas y ambientales.

Tablas obtenidas en los meses de mayo y junio.

A continuación, se presentan las tablas obtenidas en un día específico durante 5 semanas, una vez realizados los ajustes al sensor y las pruebas de laboratorio.

Tabla 4. Datos registrados por el sensor NPK el día 20/05/2025

date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K
20/05/25	10:23:18	0	26.8	117	3	0	13	5
20/05/25	10:23:28	16.9	25.9	174	3	0	41	33
20/05/25	10:23:38	20.1	23.4	178	5.2	0	43	35
20/05/25	10:23:48	19.8	22.5	197	6.6	2	52	44
20/05/25	10:23:58	20.3	22.1	198	6.4	2	52	45
20/05/25	10:24:08	20.7	22	198	6.4	2	52	45
20/05/25	10:24:18	20.5	22	198	6.5	2	52	45
20/05/25	10:24:28	20.3	21.9	198	6.5	2	52	45
20/05/25	10:24:38	19.8	21.9	198	6.5	2	52	45
20/05/25	10:24:48	20.5	21.9	199	6.6	3	53	45



Tabla 5. Datos registrados por el sensor NPK el día 27/05/2025

date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K
27/05/25	22:29:18	23.2	22.8	222	5.2	7	64	56
27/05/25	22:29:28	22.9	22.5	225	8	8	65	58
27/05/25	22:29:38	22.4	22.4	226	7.6	8	66	58
27/05/25	22:29:48	23.7	22.3	228	7.4	9	67	59
27/05/25	22:29:58	23	22.3	228	7.3	9	67	59
27/05/25	22:30:08	23.2	22.3	229	7.2	9	67	60
27/05/25	22:30:18	23.5	22.2	230	7.1	9	68	60

Tabla 6. Datos registrados por el sensor NPK el día 03/06/2025

date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K
03/06/25	10:26:18	11.7	20.5	124	3	0	17	9
03/06/25	10:26:28	11.2	21	131	5.4	0	20	12
03/06/25	10:26:38	11.4	21	131	6.8	0	20	12
03/06/25	10:26:48	11.1	21.1	131	6.8	0	20	12
03/06/25	10:26:58	10.3	21.2	131	6.8	0	20	12
03/06/25	10:27:08	10.3	21.2	131	6.8	0	20	12

Tabla 7. Datos registrados por el sensor NPK el día 10/06/2025

date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K
10/06/25	22:31:58	9.1	23	124	3	0	17	9
10/06/25	22:32:08	9.3	24.8	133	4	0	21	13
10/06/25	22:32:18	9.4	25.3	133	7.2	0	21	13
10/06/25	22:32:28	10.3	25.4	133	7.3	0	21	13
10/06/25	22:32:38	10.3	25.5	133	7.3	0	21	13
10/06/25	22:32:48	9.3	25.6	133	7.3	0	21	13

Tabla 8. Datos registrados por el sensor NPK el día 17/06/2025

date	time	Humi	Temp	EC	PH	N	P	K
17/06/25	10:34:18	8.6	22.1	127	8.6	0	18	10
17/06/25	10:34:28	7.7	21.9	127	8.5	0	18	10
17/06/25	10:34:38	7.8	21.9	128	8.5	0	18	11
17/06/25	10:34:48	8.6	21.9	127	8.5	0	18	10
17/06/25	10:34:58	7.7	21.8	128	8.5	0	18	11



En síntesis, los resultados confirman que el sistema de medición automatizado permite detectar en tiempo real las fluctuaciones en la fertilidad y condiciones físico-químicas del suelo. Este tipo de monitoreo contribuye a optimizar las decisiones de manejo agrícola y a fortalecer la educación ambiental y tecnológica en contextos escolares rurales.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la implementación de un sensor NPK JXCT-IoT, integrado a un sistema automatizado con comunicación inalámbrica LoRa y microcontrolador ESP32, constituye una herramienta eficaz para evaluar la salud del suelo en entornos agrícolas escolares. El monitoreo continuo de los parámetros de nitrógeno, fósforo, potasio, humedad, pH y conductividad eléctrica permitió obtener información precisa sobre la dinámica de fertilidad del suelo a lo largo de cinco semanas, identificando variaciones asociadas al riego, la absorción vegetal y las condiciones ambientales locales.

Los resultados evidenciaron que las concentraciones de nutrientes presentaron un incremento inicial durante las dos primeras semanas, seguido de una disminución gradual, reflejando la capacidad del sistema para detectar tendencias reales de agotamiento de nutrientes. Asimismo, el pH del suelo evolucionó de ligeramente ácido a alcalino, lo que confirma la sensibilidad del sensor NPK ante los cambios químicos del entorno. Estos hallazgos validan el uso de tecnologías IoT de bajo costo como instrumentos confiables para la agricultura de precisión educativa.

Desde el punto de vista formativo, el proyecto permitió que los estudiantes comprendieran la relación entre tecnología, ciencia del suelo y sostenibilidad, fortaleciendo competencias en electrónica, programación y análisis de datos. Esta experiencia práctica fomentó una cultura de aprendizaje basado en la experimentación y la evidencia, alineada con los principios de la educación STEM y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En términos ambientales, el sistema de monitoreo contribuye a promover un uso racional del agua y los nutrientes, previniendo la degradación del suelo y favoreciendo la productividad sostenible. Además, su aplicación en contextos escolares rurales demuestra el potencial de la innovación tecnológica para impulsar la autosuficiencia alimentaria y la conciencia ecológica comunitaria.



Finalmente, se concluye que la integración de sensores NPK en sistemas automatizados representa una estrategia viable, replicable y educativa para mejorar la gestión de suelos agrícolas, reforzar la formación científica en jóvenes y aportar al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2, 6, 7 y 12).

Se recomienda continuar con estudios longitudinales que incluyan diferentes tipos de suelos, ciclos de cultivo y estrategias de fertilización orgánica, a fin de ampliar la aplicabilidad y alcance de esta tecnología en el ámbito agroeducativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Cruz, M., & López, C. (2020). Aplicación de sensores NPK e Internet de las Cosas (IoT) en la agricultura de precisión para el monitoreo de nutrientes del suelo. Revista Iberoamericana de Tecnología y Desarrollo, 8(3), 55–68. <https://doi.org/10.33412/revtecn.8.3.345>
- Dong, D., Wang, N., Tian, H., Ma, S., & Zhao, C. (2025). The War for Fertile Soil: Advancements in Soil Nutrient Field Sensors. Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2025.04.029>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Forbes México. (2024, marzo 21). Disminuye 59% disponibilidad de agua en Península de Yucatán: informe. Forbes México. <https://forbes.com.mx/disminuye-59-disponibilidad-de-agua-en-peninsula-de-yucatan-informe/>
- González, T. (2023). Las prácticas agrícolas tradicionales de los Mayas de la Península de Yucatán. UNESCO. <https://www.unesco.org/es/articles/las-practicas-agricolas-tradicionales-de-los-mayas-de-la-peninsula-de-yucatan>
- Guzmán, J., Matuz, M., Arana, J., López, E., Gomez, V., & González, N. (2024). Avances y perspectivas de la agricultura de precisión para la sostenibilidad agrícola. XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan. 12. 1-6. DOI:10.29057/xikua.v12i24.12790.



Hamami, L., & Nassereddine, B. (2020). Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. Computers and Electronics in Agriculture **Volume 179**.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105782>

Hernández, L., & Pérez, J. (2021). Huertos escolares y educación ambiental: una estrategia para el aprendizaje sostenible en comunidades rurales. Revista Mexicana de Educación Ambiental, 7(2), 45–58. <https://doi.org/10.24875/RMEA.210002>

Jash, D., Tirthkumar, P., & Santosh, B. (2019). Smart Farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions. Procedia Computer Science. Volume 160, 2019, Pages 746-751. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.016>

Jiménez, R., Ortega, A., & Morales, D. (2022). Evaluación de la salud del suelo: indicadores químicos, físicos y biológicos en sistemas agrícolas sostenibles. Revista de Ciencias Ambientales, 56(1), 23–37. <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.2>

Martinez de Velasco, E. (2025). Los huertos urbanos comunitarios de Mérida, Yucatán y sus aliados: Retos y oportunidades para impulsar un entorno alimentario más saludable, sostenible e incluyente. Universidad Anáhuac Mayab. ISBN: 978-607-8083-42-8
DOI:10.5281/zenodo.15802039

Musa, P., Sugeru, H., & Wibowo, E. P. (2024). Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*, 24(1), 51.
<https://doi.org/10.3390/s24010051>

Nirav, R., Shreedhar, P., & Vijaya, P. (2020). Smart Farming: IOT Based Smart Sensor Agriculture Stick for Live Temperature and Humidity Monitoring. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Volume 09, Issue 07. <https://www.ijert.org/smart-farming-iot-based-smart-sensor-agriculture-stick-for-live-temperature-and-humidity-monitoring>

Quiroz, J., Almaraz, J., & Ramos, E. (2024). Transformación agrícola: implementación de un sistema de Monitoreo IoT para la gestión inteligente de cultivos. Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI, 12(Especial4), 188–198.
<https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13323>



Rodríguez, A., Vega, E., & Ramírez, F. (2023). Tecnologías de agricultura inteligente para el manejo sostenible del agua y los nutrientes del suelo en zonas semiáridas. Revista de Innovación Agrícola y Ambiental, 9(1), 15–29. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7654321>

Shukla AK, & Tripathi P. (2022). Advancements in soil nutrient sensing for real time nutrient management based recommendation system. Agricultural and Biological Research. 38(1):243-246. ISSN - 0970-1907. <https://www.abrinternationaljournal.org/articles/advancements-in-soil-nutrient-sensing-for-real-time-nutrient-management-based-recommendation-system-89320.html>

Vega, V., Fernández, D., Macedo, A., Ríos, J., & Ruiz, A. (2022). Análisis de la fertilidad del suelo mediante la validación e interpolación Kriging de sus variables. Terra Latinoamericana, 40, e1573. Epub 05 de mayo de 2023. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1573>

