

**DISPOSITIVO INTELIGENTE PARA DETERMINAR PORCENTAJES DE
MACRONUTRIENTES PRESENTES EN EL SUELO PARA CULTIVOS DE PAPA
A PARTIR DE PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y HUMEDAD.**

(Resumen Analítico)

***INTELLIGENT DEVICE FOR DETERMINING MACRONUTRIENT
PERCENTAGES IN SOIL FOR POTATO CULTIVATION BASED ON PH,
ELECTRICAL CONDUCTIVITY, AND MOISTURE.***

(Analytical Summary)

Autores (*Authors*): Cuastumal Tepud Lida Yisely, Salazar Canacuan Yerinson Ayendi

Facultad (*Faculty*): Ingeniería

Programa (*Program*): Ingeniería Mecatrónica

Asesor (*Support*): Msc. Carlos Armando Patiño Teran

Fecha de terminación del estudio (*End of the research*): Noviembre - 2024

Modalidad de Investigación (*Kind of research*): Trabajo de Grado

PALABRAS CLAVE

AGRICULTURA, MACRONUTRIENTES, PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS, SUELOS, CULTIVOS, PREDICCIÓN, INTELIGENCIA ARTIFICIAL, SENSORES, DISPOSITIVO, ALGORITMOS, REDES NEURONALES, REGRESIÓN LINEAL, ANÁLISIS DE SUELOS, BASES DE DATOS.

KEY WORDS

AGRICULTURE, MACRONUTRIENTS, PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES, SOILS, CROPS, PREDICTION, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, SENSORS, DEVICE, ALGORITHMS, NEURAL NETWORKS, LINEAR REGRESSION, SOIL ANALYSIS, DATABASES.

RESUMEN: El cultivo de papa es fundamental para la seguridad alimentaria y la economía de Colombia, destacándose el departamento de Nariño como una de las regiones productoras más importantes. Según Fedepapa, Nariño produce anualmente 585.202 toneladas de variedades como papa criolla, Diacol capira, ICA-unica, parda pastusa, pastusa suprema y superior, contando con 255.000 hectáreas aptas para su cultivo. Sin embargo, la falta de acceso a análisis avanzados de suelo lleva a muchos agricultores a fertilizar de manera empírica, aplicando un bulto de abono por bulto de papa sembrado sin considerar un previo análisis de suelo que

brinda las condiciones fisicoquímicas y nutricionales del suelo. Este enfoque genera ineficiencias en el uso de fertilizantes, reduce la productividad y ocasiona impactos ambientales significativos, como la erosión del suelo y la contaminación del agua.

La agricultura de precisión, impulsada por la inteligencia artificial (IA), emerge como una solución sostenible y eficiente para optimizar la gestión de cultivos. Este estudio presenta el desarrollo de un dispositivo basado en IA, capaz de evaluar los niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) en el suelo, utilizando variables como humedad, pH, conductividad eléctrica y temperatura. Este enfoque permite obtener tres variables cruciales a partir de cuatro variables del suelo. Para este propósito, se construyó una base de datos con 3,200 registros, utilizando sensores como el CTW NPK y el CTW multiparámetros, calibrados mediante cinco análisis realizados en el municipio de Valle del Guamuez, Putumayo.

El dispositivo fue entrenado en Google Colab utilizando cinco algoritmos de aprendizaje automático, y el modelo de redes neuronales mostró el mejor desempeño, alcanzando una precisión en campo del 78.5 %. Los datos de prueba se recolectaron en un terreno de cultivo ubicado en la vereda Bolívar, municipio de Iles, Nariño. Este dispositivo, diseñado para ser accesible y práctico, apoya la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores, promoviendo un manejo más eficiente de los nutrientes del suelo y contribuyendo a un proceso de producción de papa más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

ABSTRACT: *The cultivation of potatoes is fundamental for the food security and economy of Colombia, with the department of Nariño standing out as one of the most important producing regions. According to Fedepapa, Nariño annually produces 585,202 tons of varieties such as creole potato, Diacol capira, ICA-unica, parda pastusa, pastusa suprema, and superior, with 255,000 hectares suitable for cultivation. However, the lack of access to advanced soil analysis leads many farmers to fertilize empirically, applying one sack of fertilizer per sack of potatoes planted without considering a prior soil analysis that provides the soil's physicochemical and nutritional conditions. This approach generates inefficiencies in the use of fertilizers, reduces productivity, and causes significant environmental impacts, such as soil erosion and water contamination.*

Precision agriculture, driven by artificial intelligence (AI), emerges as a sustainable and efficient solution to optimize crop management. This study presents the development of an AI-based device capable of evaluating nitrogen, phosphorus, and potassium (NPK) levels in the soil using variables such as moisture, pH, electrical conductivity, and temperature. This approach allows obtaining three crucial variables from four soil variables. For this purpose, a database with 3,200 records was built using sensors such as the CTW NPK and the CTW multiparameter sensors, calibrated through five analyses conducted in the municipality of Valle del Guamuez,

Putumayo.

The device was trained in Google Colab using five machine learning algorithms, and the neural network model showed the best performance, achieving a field accuracy of 78.5%. The test data were collected on a cultivation plot located in the Bolívar village, municipality of Iles, Nariño. This device, designed to be accessible and practical, supports informed decision-making by farmers, promoting more efficient soil nutrient management and contributing to a more sustainable and environmentally friendly potato production process.

CONCLUSIONES: De las variables estudiadas en cultivos de papa, el pH y la conductividad eléctrica se destacan como las más importantes ya que tienen una correlación con la presencia de macronutrientes de lo cual están directamente relacionadas con el crecimiento de las plantas. Así mismo se tiene en cuenta los análisis de laboratorios convencionales permitiendo analizar las propiedades fisicoquímicas del suelo, implementando buenas prácticas agrícolas desde la preparación del suelo hasta la fertilización en cada etapa de desarrollo del cultivo.

Los sensores con referencia CTW se programaron de acuerdo al Datasheet dado por el fabricante, permitiendo obtener respuestas de lectura en los rangos establecidos, los cuales fueron calibrados a partir de análisis de suelos y sensores de laboratorio, obteniendo buenos resultados de modo que no fue necesario un previo ajuste de sensores, cabe resaltar que para obtener unos resultados precisos la humedad del suelo no se debe alterar ya que este tipo de sensores correlaciona las variables a partir de la conductividad eléctrica del suelo y la salinidad.

En el desarrollo de esta investigación, se creó una base de datos propia diseñada bajo condiciones predeterminadas presentes en diferentes tipos de suelo. Este proceso incluyó un monitoreo constante utilizando la plataforma IoT ThingSpeak, donde se registraron las siete variables clave necesarias para el análisis. Los datos recolectados fueron almacenados y procesados en formato CSV, lo que permitió su fácil manejo y análisis posterior. Como resultado de este esfuerzo, se logró publicar la base de datos en la plataforma IEEE DataPort, destacándose por su nivel de detalle y completitud. Esta publicación es particularmente relevante debido a la escasez de bases de datos similares que integren de manera exhaustiva las variables de suelos agrícolas con parámetros físico químicos, ofreciendo un recurso valioso para la comunidad científica y agrícola. Este avance no solo facilita el acceso a datos estructurados, sino que también promueve investigaciones futuras que permitan mejorar la precisión de modelos predictivos y prácticas agrícolas sostenibles.

El desarrollo de este dispositivo, se implementó exitosamente el modelo previamente entrenado en un ESP32 utilizando la biblioteca TensorFlow Lite. Esto permitió que el dispositivo funcione de manera autónoma, realizando predicciones de macronutrientes a partir de datos obtenidos por un sensor multiparámetros, sin

requerir otros recursos externos.

Este dispositivo ha demostrado ser una herramienta integral y eficiente para el análisis de suelos, a partir de lecturas del sensor multiparámetros (pH, conductividad eléctrica, temperatura, humedad), se obtienen niveles de NPK con un determinado modelo de aprendizaje. Lo cual al obtener tres variables como nitrógeno, fósforo y potasio desde un solo sensor, no solo simplifica el proceso de análisis de suelos, sino que también representa una alternativa accesible frente a otros dispositivos de alto costo en el mercado.

El desarrollo de este dispositivo permitió la integración de sensores opcionales, haciéndolo una herramienta escalable y versátil. Además del sensor multiparámetros integra un modelo de predicciones de macronutrientes, en este se incorporó la opción de utilizar el sensor CTW NPK en caso de que el sensor multiparámetro no esté disponible durante el proceso. Esta flexibilidad garantiza que el dispositivo pueda adaptarse a diferentes necesidades en el análisis de suelos.

De tal manera que, para proporcionar autonomía en campo, el dispositivo incorpora una batería recargable de litio junto con su propio puerto de carga, lo que permite una operatividad continua de aproximadamente 2 horas en terreno siendo este dispositivo un apoyo a la lectura de macronutrientes y que el agrónomo pueda brindar un plan de fertilización útil.

Entre las principales limitaciones identificadas en el dispositivo, se encuentra la incapacidad de almacenar las variables medidas, lo que dificulta el seguimiento continuo del estado del suelo a lo largo del tiempo. Esto obliga al usuario a recurrir a herramientas externas para registrar los datos, lo que puede generar pérdidas de información. Por lo tanto, se recomienda desarrollar un servidor web que permita almacenar y organizar las variables del suelo de manera centralizada, facilitando la visualización histórica y el análisis comparativo.

Adicionalmente, durante la recolección de la base de datos en diferentes tipos de suelo, se observó que no existía una correlación lineal clara entre las variables pH, humedad, temperatura conductividad eléctrica con los macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio). Esta falta de relación lineal llevó a que el modelo utilizado presentara un margen de error del 21.5%. Por lo tanto, se sugiere explorar otros modelos de aprendizaje automático más avanzados, como redes neuronales convolucionales o modelos de aprendizaje profundo optimizados, que puedan capturar mejor las relaciones no lineales entre las variables. Además, es esencial realizar una retroalimentación constante de la base de datos, incorporando nuevos registros provenientes de diferentes tipos de suelos y condiciones ambientales para mejorar la precisión del modelo. Estas mejoras contribuirán a fortalecer el rendimiento del dispositivo y a consolidarlo como una herramienta confiable para la agricultura de precisión.

Los sensores CTW NPK y CTW multiparámetros deben calibrarse exclusivamente mediante análisis en suelos, ya que presentan imprecisiones al medir variables en líquidos. Esto se debe a que estos sensores están diseñados para trabajar con la conductividad característica de los suelos, donde las propiedades físicas y químicas influyen en las mediciones. Por lo tanto, es fundamental realizar pruebas de calibración específicas en muestras representativas de suelo para garantizar lecturas precisas y confiables, adecuadas para las aplicaciones agrícolas.

El uso de este tipo de sensores permitió a los agricultores optimizar sus procesos productivos al proporcionar información precisa sobre las condiciones del suelo, facilitando una gestión más eficiente de los recursos y reduciendo el uso excesivo de fertilizantes. Esta tecnología respalda los principios de la agricultura sostenible promovidos por la FAO y contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) globales, en especial los relacionados con la acción climática, la seguridad alimentaria y la gestión sostenible de los recursos naturales.

CONCLUSIONS: *Among the variables studied in potato crops, pH and electrical conductivity stand out as the most important as they correlate with the presence of macronutrients, which are directly related to plant growth. Conventional laboratory analyses are also considered, allowing the analysis of soil physicochemical properties, and implementing good agricultural practices from soil preparation to fertilization at each stage of crop development.*

The CTW reference sensors were programmed according to the datasheet provided by the manufacturer, allowing reading responses within the established ranges, which were calibrated based on soil analyses and laboratory sensors, yielding good results, so no prior sensor adjustment was necessary. It is important to note that for accurate results, soil moisture should not be altered as these sensors correlate variables based on soil electrical conductivity and salinity.

In the development of this research, a custom database was created under predetermined conditions present in different soil types. This process included constant monitoring using the IoT platform ThingSpeak, where the seven key variables necessary for analysis were recorded. The collected data was stored and processed in CSV format, allowing easy handling and subsequent analysis. As a result of this effort, the database was published on the IEEE DataPort platform, standing out for its level of detail and completeness. This publication is particularly relevant due to the scarcity of similar databases that comprehensively integrate agricultural soil variables with physicochemical parameters, offering a valuable resource for the scientific and agricultural community. This advancement not only facilitates access to structured data but also promotes future research to improve the accuracy of predictive models and sustainable agricultural practices.

In developing this device, the previously trained model was successfully

implemented on an ESP32 using the TensorFlow Lite library. This allowed the device to operate autonomously, making macronutrient predictions from data obtained by a multiparameter sensor, without requiring other external resources.

This device has proven to be an integral and efficient tool for soil analysis. Based on readings from the multiparameter sensor (pH, electrical conductivity, temperature, moisture), NPK levels are obtained with a specific learning model. Obtaining three variables such as nitrogen, phosphorus, and potassium from a single sensor not only simplifies the soil analysis process but also represents an accessible alternative compared to other high-cost devices on the market.

The development of this device allowed for the integration of optional sensors, making it a scalable and versatile tool. Besides the multiparameter sensor, it includes a macronutrient prediction model, with the option to use the CTW NPK sensor if the multiparameter sensor is not available during the process. This flexibility ensures that the device can adapt to different needs in soil analysis.

To provide field autonomy, the device incorporates a rechargeable lithium battery with its charging port, allowing continuous operation for approximately 2 hours in the field. This device supports macronutrient readings, enabling agronomists to provide a useful fertilization plan.

Among the main limitations identified in the device is the inability to store the measured variables, making it difficult to continuously monitor soil conditions over time. This forces users to rely on external tools to record data, which can lead to information loss. Therefore, it is recommended to develop a web server to store and organize soil variables centrally, facilitating historical visualization and comparative analysis.

Additionally, during the database collection in different soil types, it was observed that there was no clear linear correlation between the variables pH, moisture, temperature, electrical conductivity with macronutrients (nitrogen, phosphorus, and potassium). This lack of linear relationship led to the model having a margin of error of 21.5%. Therefore, it is suggested to explore more advanced machine learning models, such as convolutional neural networks or optimized deep learning models, which can better capture nonlinear relationships between variables. It is also essential to constantly update the database, incorporating new records from different soil types and environmental conditions to improve the model's accuracy. These improvements will help strengthen the device's performance and establish it as a reliable tool for precision agriculture.

The CTW NPK and CTW multiparameter sensors must be calibrated exclusively through soil analysis, as they show inaccuracies when measuring variables in liquids. This is because these sensors are designed to work with the characteristic conductivity of soils, where physical and chemical properties influence

measurements. Therefore, it is crucial to perform specific calibration tests on representative soil samples to ensure accurate and reliable readings suitable for agricultural applications.

The use of these types of sensors has allowed farmers to optimize their production processes by providing accurate information about soil conditions, facilitating more efficient resource management and reducing excessive fertilizer use. This technology supports the principles of sustainable agriculture promoted by the FAO and contributes to the global Sustainable Development Goals (SDGs), especially those related to climate action, food security, and sustainable resource management.

RECOMENDACIONES: Para obtener lecturas precisas de los sensores CTW, tanto el sensor NPK como el multiparámetro deben usarse bajo condiciones donde la humedad del suelo no se vea alterada por lluvias u otros factores externos, ya que esto garantiza que los datos reflejen las condiciones reales del suelo. Además, se recomienda actualizar y retroalimentar la base de datos del dispositivo con nuevas variables que mejoren el modelo, permitiendo mediciones más precisas y confiables para el agricultor. A futuro, es recomendable implementar un sistema autónomo de fertilización para el cultivo de papa, de modo que el dispositivo pueda sugerir planes de fertilización óptimos sin necesidad de un ingeniero agrónomo. Esto facilitaría que los agricultores gestionen de forma autónoma la fertilización de sus cultivos, optimizando sus recursos y aumentando su eficiencia.

Para facilitar a los usuarios el acceso digital a los resultados del análisis de suelos, se recomienda desarrollar una plataforma en línea que, aprovechando la conectividad del módulo ESP32, permitiendo almacenar y visualizar las variables de manera remota. Esto brindaría a los agricultores acceso directo a los datos y la posibilidad de realizar un seguimiento más preciso de las condiciones del suelo, mejorando así la toma de decisiones para la gestión agrícola.

Para mejorar la precisión del dispositivo en futuros desarrollos, se recomienda explorar y evaluar otros algoritmos de aprendizaje automático como modelos de Gradient Boosting, Random Forest o redes neuronales profundas, que pueden ofrecer mejoras en la precisión en comparación con la regresión lineal y configuraciones básicas de redes neuronales. Además, sería beneficioso aplicar técnicas de optimización de hiperparámetros mediante Random Search, para encontrar configuraciones óptimas que maximicen la precisión.

RECOMMENDATIONS: *To obtain accurate readings from the CTW sensors, both the NPK sensor and the multiparameter sensor must be used under conditions where soil moisture is not altered by rain or other external factors, as this ensures that the data reflects the actual soil conditions. Additionally, it is recommended to update and feed back the device's database with new variables that improve the model, allowing more precise and reliable measurements for the farmer. In the*

future, it is advisable to implement an autonomous fertilization system for potato cultivation, so that the device can suggest optimal fertilization plans without the need for an agronomist. This would facilitate farmers to autonomously manage the fertilization of their crops, optimizing their resources and increasing their efficiency.

To facilitate digital access for users to the results of soil analysis, it is recommended to develop an online platform that, leveraging the connectivity of the ESP32 module, allows storing and visualizing the variables remotely. This would provide farmers with direct access to the data and the ability to more accurately track soil conditions, thus improving decision-making for agricultural management.

To improve the device's accuracy in future developments, it is recommended to explore and evaluate other machine learning algorithms such as Gradient Boosting models, Random Forest, or deep neural networks, which may offer improvements in accuracy compared to linear regression and basic neural network configurations. Additionally, it would be beneficial to apply hyperparameter optimization techniques using Random Search to find optimal configurations that maximize accuracy.