EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Desarrollo, calibración y validación de un dispositivo de medición multivariable de características de suelo como apoyo para la generación de diagnósticos de fertilidad

Helber Milton Orjuela Matta[1], Christian José Mendoza Castiblanco[2], Óscar Iván Monsalve Camacho[1]

[1]Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Bogotá, Colombia
[2]Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

Resumen

Los diagnósticos de fertilidad son estrategias útiles para identificar la disponibilidad de nutrientes presentes en los suelos agrícolas, con mediciones y datos tradicionalmente generados a partir de un análisis de laboratorio producto del muestreo in situ. Las mediciones directas de características de suelo facilitan el establecer las variaciones espaciales y en tiempo real. La necesidad de diseñar y validar un prototipo integral capaz de medir la conductividad eléctrica, el pH, la humedad, la concentración de carbono orgánico, la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, bases y la acidez intercambiables, están orientados para la generación de diagnósticos de fertilidad con precisión a partir de datos medidos directamente en el sitio de producción. El objetivo de la presente investigación consiste en desarrollar, calibrar y validar un prototipo sensor multivariable para la medición en laboratorio y campo de la conductividad eléctrica, el pH, la humedad, el carbono orgánico y macronutrientes disponibles utilizando una metodología de calibración a escala de laboratorio, con validaciones en campo para tres zonas de referencia. El desarrollo tecnológico planteado busca realizar mediciones puntuales multivariable, con reducción de tiempos para la adquisición de datos, con posibilidad de multiplicar las mediciones para diferentes áreas de producción, y para la generación de recomendaciones más precisas que estén alineadas con el desarrollo de prácticas sostenibles. La metodología incluye el desarrollo de un prototipo de medición multivariable que incluye un diseño base, una integración de componentes, una programación de controladores, GPS, sensores y pantalla táctil HMI, ubicados espacialmente dentro de una carcasa e incluyendo módulos de recepción, transmisión, visualización y control de datos. La calibración del prototipo se pretende por medio de mediciones directas con el prototipo sobre muestras de suelo procesadas en tres laboratorios de suelos certificados y un proceso de modelado matemático por característica de suelo como medida de ajuste entre las mediciones del prototipo y los resultados de cada laboratorio. La validación del prototipo en campo se hará en

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4362

tres zonas, distribuidas en los municipios de Mosquera y Bojacá en Cundinamarca y Espinal, Tolima. Aplicando técnicas de análisis multivariado, se pretende establecer la variación de las características de suelo en función de las mediciones iniciales del prototipo con posterior calibración según los resultados disponibles de laboratorio. Con el equipo calibrado, serán realizadas mediciones en campo y muestreo de suelo comparativo para establecer nuevos ajustes de operación del prototipo, aplicando técnicas de análisis multivariado.

Palabras clave: macronutrientes; multivariable; prototipo; sensor; suelo

Abstract

Fertility diagnostics are useful strategies for identifying the availability of nutrients present in agricultural soils. Measurements and data are traditionally generated through laboratory analysis based on in situ sampling. Direct measurements of soil properties facilitate the identification of spatial and real-time variations. Design and validate an integrated prototype capable of measuring electrical conductivity, pH, moisture, organic carbon concentration, the availability of nitrogen, phosphorus, and potassium, exchangeable bases, and exchangeable acidity. This aims to enable the generation of precise fertility diagnostics based on data measured directly at the production site. This research aims to develop, calibrate, and validate a multivariable sensor prototype for laboratory and field measurement of electrical conductivity, pH, moisture, organic carbon, and available macronutrients. It will use a laboratory-scale calibration methodology with field validations in three reference zones. The proposed technological development aims to enable point-based multivariable measurements, reducing data acquisition time. This has the potential to replicate measurements across different production areas and generate more accurate recommendations aligned with the implementation of sustainable practices. The methodology includes developing a multivariable measurement prototype that incorporates a base design, component integration, programming of controllers, GPS, sensors, and an HMI touchscreen, all spatially organized within a casing and including modules for data reception, transmission, visualization, and control. Prototype calibration will be done through direct measurements on processed soil samples from three certified soil laboratories, along with mathematical modeling for each soil property to adjust the prototype measurements against laboratory results. Field validation of the prototype will be conducted in three zones: Mosquera and Bojaca in Cundinamarca and Espinal in Tolima. The study uses multivariate analysis techniques to establish the variation in soil properties based on the prototype's initial measurements, followed by calibration using available laboratory data. Once the prototype is calibrated, field measurements and comparative soil sampling will be performed to establish new operational adjustments, again applying multivariate analysis techniques.

Keywords*: macronutrients; multivariable; prototype; sensor; soil*

1. Introducción

Los diagnósticos de fertilidad son estrategias útiles y necesarias para identificar la disponibilidad de nutrientes en solución presentes en suelos agrícolas, comprender las dinámicas del suelo según

los cambios en sus características y el potencial de movilidad de estos nutrientes hacia las raíces de los cultivos (Alarcón Vera, 2015).

Por otra parte, los suelos colombianos se caracterizan por presentar variabilidad espacial según las condiciones del relieve, la topografía, el clima y las características del material parental o de origen asociado, propias de cada región; (Dos Santos, *et al.*, 2023); (Näsi, *et al.*, 2023). Además, existe evidencia que las correlaciones físicas, químicas y biológicas del suelo sobre una misma unidad productiva son igualmente cambiantes (Garbanzo-León, Alemán-Montes, Alvarado-Hernández, & Henríquez-Henríquez, 2017). Algunas de las características de suelo que se han reconocido con particular relevancia y relacionadas con estos impactos en los rendimientos, incluyen variaciones en el contenido de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), el contenido de potasio (K), fósforo (P) y magnesio (Mg) disponible e intercambiable, la textura que incluye los contenidos de Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar), la conductividad eléctrica (CE), el pH y la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICe) (Gómez, Magnitskiy, Rodríguez, & Darghan, 2017), que pueden impactar en la capacidad de retención y movimiento de agua, perturbando (NOOA Physical Sciences Laboratory (PSL), 2023) También, se condiciona el comportamiento del suelo con la distribución de precipitaciones y dinámicas de elementos climáticos como la temperatura, velocidad de viento, la humedad relativa, evapotranspiración, integrado como resultados a través del Balance Hídrico de los cultivos, a partir de la definición de la escala de análisis (Peña-Beltrán & Pabón-Caicedo, 2020).

Por otra parte, la agricultura de precisión se fundamenta en ajustar el desarrollo de las prácticas agronómicas según la variación espacial de las características de suelo y clima, en momentos clave de un ciclo de producción, con cambios referidos a las diferentes etapas de desarrollo y crecimiento de un cultivo (Gobezie & Biswas, 2023); (Orjuela-Matta, Rubiano-Sanabria, & Camacho-Tamayo, 2010). Existen evidencias de metodologías desarrolladas con aplicaciones a estudios de caso, pero con posibilidad de réplica como una función de la distribución y dinámica de las características de suelo para establecer las variaciones en diferentes momentos asociados al esquema de producción (Cortés-D, Camacho-Tamayo, & Giraldo, 2018). La conductividad eléctrica (Lima dos Santos, de Queiroz, M. V., Khorsandi, & de Moura Araújo, 2023), el pH, la humedad, la capacidad de intercambio catiónico efectivo y el carbono orgánico del suelo son características que se adaptan a esta versatilidad que se busca para el desarrollo de la presente investigación porque facilitan el proceso de generación de diagnósticos de fertilidad.

La conductividad eléctrica, el pH, y la humedad volumétrica (Hv) están relacionadas con el comportamiento dieléctrico del suelo cuando este es sometido al paso de una corriente eléctrica tipo radiofrecuencia, es decir, con la posibilidad de ser generada a diferentes frecuencias de onda (McNeill, 1992). La facilidad o resistencia para esta transmisión eléctrica condiciona el resultado de la medición, influenciado por la concentración de sales disueltas en la fase soluble del suelo (CE, pH y Hv) o como un promedio representativo del perfil del suelo (Conductividad Eléctrica Aparente – CEa), en función de la profundidad evaluada, la especie vegetal vinculante (cultivo) y de las particularidades propias del dispositivo utilizado para obtener esa medición (Machado, Montanari, Shozo Shiratsuchi, Lovera, & De Souza Lima, 2015). En 1989, fue formulado un modelo de conductancia eléctrica que relaciona la humedad volumétrica del suelo y una humedad en la ruta líquida continua, es decir, la humedad a través de una red continua entre partículas de suelo

que permite el paso de la corriente eléctrica a través de sales disueltas, lo que implica asociar la conductividad eléctrica para cada nivel de humedad (Rhoades, Corwin, Lesch, & Scott, 1999). A modo de interpretación general, el modelo (ecuación) propuesto en ese entonces representa una conductividad eléctrica total, considerando el agua en macro poros y el agua disponible en una red continua a través del suelo. También refleja la salinidad del suelo por la influencia de las sales disueltas presentes, siendo útil para establecer y analizar la distribución espacial de la salinidad en el suelo.

Por otra parte, la disponibilidad de macronutrientes o nutrientes primarios depende de los cambios en las condiciones edáficas y agroclimáticas, siendo fundamental establecer relaciones para definir un manejo nutricional particular y un uso eficiente de los nutrientes, buscando potenciar la productividad y la sostenibilidad de los cultivos (Gómez, Magnitskiy, Rodríguez, & Darghan, 2017). El Nitrógeno es el nutriente que las plantas demandan en mayor cantidad, siendo el nitrato y el amonio las principales fuentes disponibles para ser absorbidas por las plantas. La materia orgánica es una de las fuentes capaces de proporcionar este elemento, aunque generalmente, su disponibilidad no es suficiente, de ahí la necesidad de generar aportes adicionales por medio de fertilizantes que permitan ajustar metas en rendimiento y crecimiento de los cultivos (Sánchez-de Jesús, Volke-Haller, Cortés-Flores, María-Ramírez, & San-Martín-Hernández, 2024).

Los sensores de superficie para suelo pueden incluirse en varias categorías, por ejemplo, según las características de diseño, las aplicaciones en campo o laboratorio, y con particularidad referidas a los principios que fundamentan su operación (Adamchuk, Hummel, Morgan, & Upadhyaya, 2004). Algunos de estos sensores utilizan el principio de *electromagnetismo*, es decir, equipos que registran las respuestas de un campo magnético (inducción electromagnética) con respuestas variables en función de las coordenadas geográficas (X, Y, Z) del punto de muestreo, facilitando, por ejemplo, la evaluación topográfica de un terreno ondulado con pendientes cambiantes o una zona con variable y densa vegetación, muchas veces combinado con principios de *teledetección óptica y radiométrica* (Tang, Xie, Dou, Zhang, & Chen, 2023) e incluso métodos acústicos (Jianguang, Bingluo, Guanghui, & Zhiwei, 2022).

Las características físicas y químicas de los suelos se asocian usualmente con principios de operación de **sensores eléctricos y electromagnéticos**. A continuación, se relacionan algunas características de suelo evaluadas a través de estos principios operativos.

Tabla 1. Características de suelo medidas con sensores que operan a través de principios eléctricos y electromagnéticos.

Principio	**Característica**													
	Textura (A, L, Ar)	**MO**	**CO**	**CH**	**CE**	**N_2**	**CICe**	**Ca**	**Mg**	**pH**	**Na**	**N**	**P**	**K**
Eléctrico y electromagnético	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

*A: Arena, L: Limo, Ar: Arcilla, MO: Materia Orgánica, CO: Carbono Orgánico, CH: Contenido de Humedad, CE: Conductividad Eléctrica, N_2: Nitrógeno Total, CICe: Capacidad de Intercambio Catiónico efectivo, Ca: Calcio, Mg: Magnesio, pH: pH, Na: Sodio, N: Nitrógeno disponible, P: Fósforo disponible, K: Potasio disponible.

Fuente: Adamchuk, V. I., *et al.*, 2004; Elaboración propia, 2024.

Para medir datos físicos y químicos del suelo, muchos dispositivos aprovechan las propiedades dieléctricas (Onsy Mohamed & Paleologos, 2018) bajo condiciones naturales para establecer la capacidad del medio poroso para conducir electricidad, es decir, a través de su Resistividad Eléctrica o en ocasiones para almacenar electricidad (voltaje o intensidad de corriente eléctrica) de acuerdo con los principios definidos a través de la Ley de Faraday mediante *métodos no invasivos* (De Jong, Ballantyne, Cameron, & Read, 1979); (McNeill, 1980); (Hendrickx & Kachanoski, 2002). Algunos estudios describen el uso de sensores combinados con el propósito de integrar principios operativos con un número determinado de características por medir. Las combinaciones identificadas por afinidad de principios operacionales incluyen sensores mecánicos y ópticos (Bristow, Kluitenberg, Goding, & Fitzgerald, 2001), sensores mecánicos, dieléctricos y de rayos gamma (Hemmat & Adamchuk, 2008), sensores dieléctricos (Naderi-Boldaji, Sharifi, Jamshidi, Younesi-Alamouti, & Minaee, 2011) y ópticos o sensores piezoeléctricos de emisión acústica de alta frecuencia (20 – 350 KHz) (Rezaei, Karparvarfard, Naderi-Boldaji, Azimi-Nejadian, & Tekeste, 2022).

Los cambios espaciales que son detectados por la medición con sensores de superficie son útiles para la gestión de diagnósticos de fertilidad (Duffera, White, & Weisz, 2007). La frecuencia de uso de estas tecnologías cambia según las necesidades de evaluación dentro de un ciclo productivo para cartografiar la disponibilidad de nutrientes (Kaul, Hill, & Walthall, 2005) y los requerimientos de fertilización, a partir de correlaciones que sean identificables entre las diferentes características de suelo por cada instante de interés (Mazur, Gozdowski, Stępień, & Wójcik-Gront, 2023); (Landeras, Ortiz-Barredo, & J.J., 2009).

El objetivo de la presente investigación actualmente en desarrollo consiste en diseñar, programar y construir un prototipo sensor multivariable que incluya un proceso de calibración de las características de suelo por medición directa y comparación sobre muestras de laboratorio procesadas y con resultados disponibles en laboratorios certificados, generando procesos de modelación matemática por característica de suelo. Una validación de la operatividad del equipo calibrado se pretende sobre tres áreas productivas, dos de ellas localizadas en los municipios de Bojacá y Mosquera en Cundinamarca y una de ellas en Espinal, departamento del Tolima. Una malla de muestreo regular será utilizada para la medición en campo con el prototipo y para extraer algunas muestras no disturbadas de suelo, buscando comparar bajo una estrategia de análisis multivariado los resultados en campo frente a los de laboratorio.

2. Planteamiento del problema

El suelo agrícola es fundamental para el desarrollo de los cultivos porque compone de forma general una fase sólida con compuestos minerales y orgánicos, una fase líquida que facilita el movimiento de nutrientes presentes en el suelo, una fase gaseosa con particularidad a la cantidad

oxígeno y dióxido de carbono los cuales interactúan con diferentes microorganismos (Schaetzl RJ, 2015). Estas interacciones se verifican mediante la identificación de las características físicas, químicas y biológicas, particulares, que se relacionan con la capacidad de nutrición del suelo, ayudan a preservar la fertilidad e impactan los rendimientos asociados al esquema de producción. Existen diferentes factores de degradación que inciden en las variaciones de las características del suelo, tal como los factores físicos, químicos y biológicos. Estos efectos de degradación pueden ocurrir cuando por ejemplo, se aplican fertilizantes sin establecer una identificación exhaustiva de la variación espacial de las características del suelo, acarreando problemas de salinización, acidificación, contaminación por transporte de solutos, pérdida de materia orgánica, compactación, siendo reflejada además, una disminución de la productividad agrícola, con particularidad en zonas que no incentivan un manejo sostenible del suelo fundamentado en evidencia científica (Karlen & Rice, 2015); (Baumhardt, Stewart, & Sainju, 2015).

Usualmente, los laboratorios de suelo tardan en procesar y emitir resultados debido a que es necesario un proceso preliminar de preparación y análisis de las muestras. Adicionalmente, generalmente se requiere el uso de equipos especializados y en algunos casos altamente costosos, que deben ser calibrados periódicamente para garantizar exactitud. Sumado a esto, es necesario contar con personal especializado para interpretar resultados y generar recomendaciones fundamentadas en normas nacionales o internacionales, siendo necesaria la consolidación de un reporte detallado. Los métodos de obtención de parámetros pueden ser complejos y en ocasiones demandar repeticiones para comprobar o validar resultados (Horneck, Sullivan, Owen, & Hart, 2011); (Guo, 2021).

Existe una necesidad para desarrollar técnicas de medición de características del suelo con alta exactitud y eficiencia que ayude a profundizar el entendimiento del suelo. La integración de un prototipo de sensor para la medición de múltiples características del suelo con portabilidad en campo proporciona una solución más rápida y económica comparado con análisis de suelos tradicionales(Postolache, Sebastião, Viegas, Postolache, & Cercas, 2023).

3. Hipótesis y/o pregunta de investigación

El desarrollo de un prototipo de sensor para la medición múltiples características del suelo permitirá obtener mediciones exactas y operativamente eficientes mediante la integración de modelos matemáticos de calibración, técnicas de filtrado y blindaje para reducir interferencias, y el uso de materiales de referencia para mejorar la selectividad y sensibilidad iónica. Se espera que la exactitud del prototipo sea validada a través de comparaciones con datos de laboratorio y análisis estadísticos univariados y multivariados, demostrando su capacidad para generar diagnósticos confiables en condiciones de campo a distintas profundidades. Por las razones anteriores se proponen las preguntas de investigación **¿El prototipo de sensor es operativo para medir características del suelo? Y ¿En qué medida las estrategias de calibración y validación propuestas son efectivas, asegurando la exactitud del prototipo y la disponibilidad de información de las características del suelo en tiempo real?**

4. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar y validar un prototipo de sensor adaptable a diferentes profundidades para la medición en campo de características de suelo.

Objetivos específicos

Diseñar y construir un prototipo de sensor con capacidad de medición multivariable de características del suelo a diferentes profundidades.
Calibrar el prototipo mediante la comparación de sus mediciones con análisis de referencia de laboratorio, optimizando su exactitud y sensibilidad.
Validar la operatividad del prototipo en condiciones de campo, analizando la variabilidad espacial de las características del suelo con apoyo de herramientas de modelación.

5. Materiales y métodos

OE 1: La siguiente figura resume las actividades clave para el desarrollo del objetivo específico 1. La identificación de sensores comerciales disponibles, el desarrollo de módulos específicos y la integración de los componentes que incluya una pantalla HMI, un controlador (Raspberry PI), un GPS, sensores, incluye programación en Python y un entorno gráfico tipo Node Red, buscando la portabilidad para la medición de características de suelo, estableciendo puntos de muestreo.

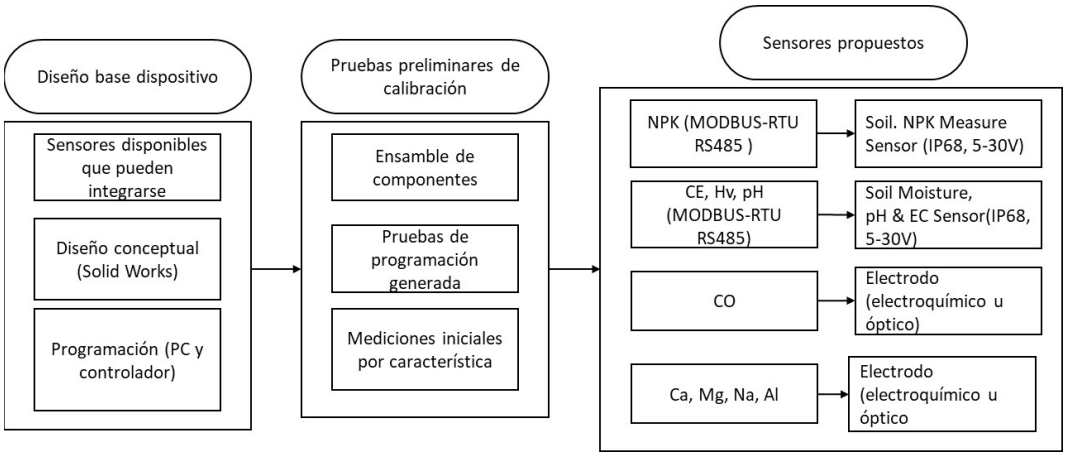

Figura 1. Actividades clave identificadas para el desarrollo del objetivo específico 1 (OE 1).

El proceso de calibración en laboratorio incluye mediciones directas sobre muestras de suelo con procesamientos y análisis previos y con orígenes variados. Análisis univariados de Random Forest y procesos de regresión logarítmica facilitarán el ajuste y calibración del prototipo de acuerdo con el origen de las muestras de suelo comparativas. Se analizarán covariables como la humedad del suelo y el tamaño de submuestras para establecer posibles condiciones de calibración y limitantes de uso del prototipo.

OE 2: La siguiente figura resume las actividades clave para el desarrollo del objetivo específico 2.

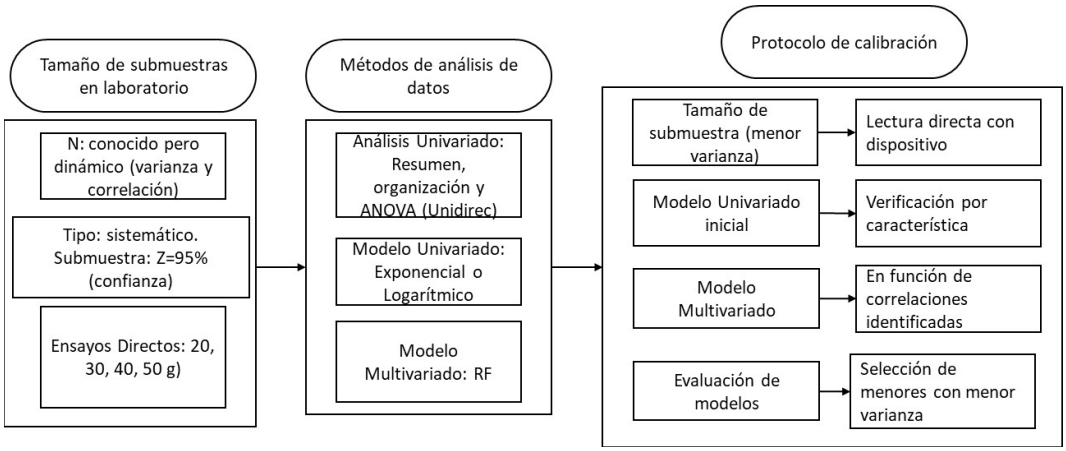

Figura 2. Actividades clave identificadas para el desarrollo del objetivo específico 2 (OE 2).

Las validaciones en campo consisten en diseñar una malla de muestreo espacial, destacando 4 profundidades de análisis, de manera que se puedan establecer ajustes finales de la operatividad del prototipo. Un análisis univariado de Random Forest facilitará el ajuste de cada característica de suelo a las condiciones de campo, mientras que un análisis multivariado permitirá establecer correlaciones existentes y ajustes por errores probables de medición con el prototipo de acuerdo con las condiciones asociadas al estado de evolución de los suelos, es decir, clima, relieve, y características como la textura, densidad real y aparente

OE 3: La siguiente figura resume las actividades clave para el desarrollo del objetivo específico 3.

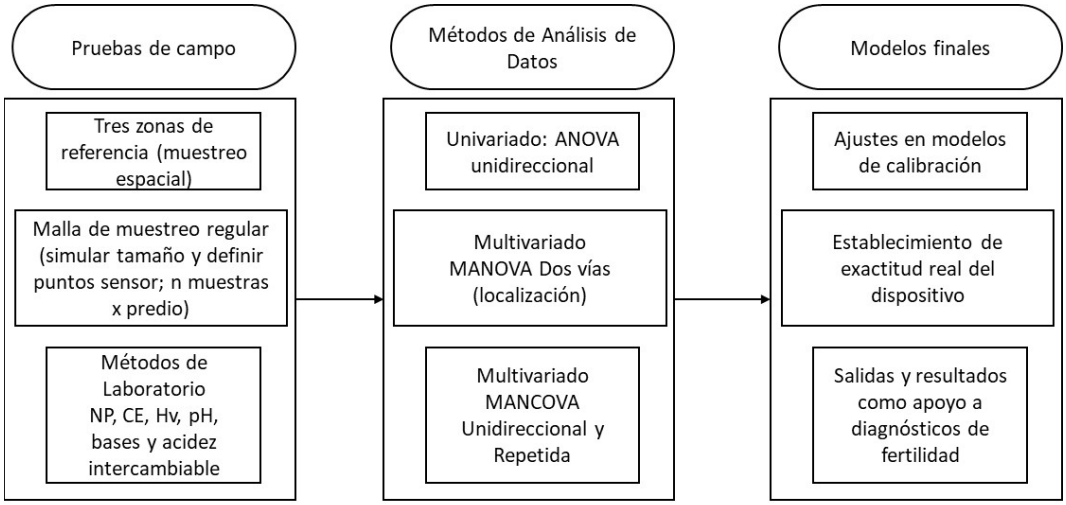

Figura 3. Actividades clave identificadas para el desarrollo del objetivo específico 3 (OE 3).

6. Referencias

- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 71-91. doi:10.1016/j.compag.2004.03.002
- Addiscott, T. M. (1974). Potassium and the Absorption of Calcium and Magnesium by Potato Plants from Soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 25*(9), 1165-1172. doi:10.1002/jsfa.2740250914
- Alarcón Vera, A. L. (2015). *Módulo 10: Diagnóstico agrícola. Agua, suelo y material vegetal.* Universidad Politécnica de Cartagena.
- Baumhardt, R. L., Stewart, B. A., & Sainju, U. M. (2015). North American Soil Degradation: Processes, Practices, and Mitigating Strategies. *Sustainability, 7*(3), 2936-2960. doi:10.3390/su7032936
- Bristow, K. L., Kluitenberg, G. J., Goding, C. J., & Fitzgerald, T. S. (2001). A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture, 31*(3), 265-280. doi:10.1016/S0168-1699(00)00186-1
- Cole, J. C., Smith, M. W., Penn, C. J., Cheary, B. S., & Conaghan, K. J. (2016). Nitrogen, phosphorus, calcium, and magnesium applied individuallyor as a slow release or controlled release fertilizer increase growthand yield and affect macronutrient and micronutrient concentrationand content of field-grown tomato plants. *Scientia Horticulturae, 211*, 420-430. doi:10.1016/j.scienta.2016.09.028
- Cortés-D, D. L., Camacho-Tamayo, J. H., & Giraldo, R. (2018). Spatial prediction of soil infiltration using functional geostatistics. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica, 53*(2), 1-7.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture, 46*(1-3), 11-43. doi:10.1016/j.compag.2004.10.005
- De Jong, E., Ballantyne, A. K., Cameron, D. R., & Read, D. W. (1979). Measurement of Apparent Electrical Conductivity of Soils by an Electromagnetic Induction Probe to Aid Salinity Surveys. *Soil Sci. Soc. Am., 43*, 810-812.
- Dos Santos, C. R., Matsunaga, A. T., Costa, L. R., Dos Santos, M. L., Brasil Neto, A. B., Rodrigues, R. P., . . . De Melo, V. S. (2023). Spatial variability of soil fertility under agroforestry system and native forest in eastern Amazonia, Brazil. Bioscience Journal, 39. doi:10.14393/BJ-v39n0a2023-62830
- Duffera, M., White, J. G., & Weisz, R. (2007). Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties: Implications for site-specific management. *Geoderma, 137*, 327-339.
- Garbanzo-León, G., Alemán-Montes, B., Alvarado-Hernández, A., & Henríquez-Henríquez, C. (2017). Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. (93). doi:10.14350/rig.54706
- Gharaibeh, M. A., Albalasmeh, A. A., & El Hanandeh, A. (2021). Estimation of saturated paste electrical conductivity using three modelling approaches: Traditional dilution extracts; saturation percentage and artificial neural networks. *CATENA, 200*. doi:10.1016/j.catena.2020.105141
- Gobezie, T. B., & Biswas, A. (2023). The need for streamlining precision agriculture data in africa. *Precision Agriculture, 24*(1), 375-383. doi:10.1007/s11119-022-09928-w
- Gómez, M. I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L. E., & Darghan, A. E. (2017). Accumulation of N, P, and K in the tubers of potato (Solanum tuberosum L. ssp. andigena) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *Agronomía Colombiana, 35*(1), 59-67. doi:10.15446/agron.colomb.v35n1.61068

- Gómez, M. I., Magnitskiy, S., Rodríguez, L. E., & Darghan, A. E. (2017). Accumulation of N, P, and K in the tubers of potato (Solanum tuberosum L. ssp. Andigena) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *35*(1), 59-67. doi:10.15446/agron.colomb.v35n1.61068
- Guo, M. (2021). Soil Health Assessment and Management: Recent Development in Science and Practices . *Spoil systems, 5*(4), 1-20. doi:10.3390/soilsystems5040061
- Hemmat, A., & Adamchuk, V. (2008). Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and Electronics in Agriculture, 63*(2), 89-103. doi:10.1016/j.compag.2008.03.001
- Hendrickx, J. M., & Kachanoski, R. G. (2002). Nonintrusive electromagnetic induction. In "Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods". *Soil Science Society of America*, 1297–1306.
- Horneck, D., Sullivan, D., Owen, J., & Hart, J. (2011). *Soil Test Interpretation Guide.* Oregon: Oregon State University - Extension Service. Obtenido de https://www.canr.msu.edu/foodsystems/uploads/files/soil_test_interpretation.pdf
- Jan, R., & Hussan, S. U. (2022). Fate of Potassium in Crop Production. *Journal of Community Mobilization and Sustainable Development, 17*(4), 1203-1212.
- Jianguang, H., Bingluo, G., Guanghui, Z., & Zhiwei, L. (2022). High-Precision Depth Domain Migration Method in Imaging of 3D Seismic Data in Coalfield. *Remote Sensing, 14*(12). doi:10.3390/rs14122850
- Karlen, D. L., & Rice, C. W. (2015). Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn? *Sustainability, 7*(9), 12490-12501. doi:10.3390/su70912490
- Kaul, M., Hill, R., & Walthall, C. (2005). Artificial neural networks for corn and soybean yield prediction. *Agricultural Systems, 85*(1), 1-18. doi:10.1016/j.agsy.2004.07.009
- Kroulík, M., Hůla, J., Šindelář, R., & Illek, F. (2007). Water infiltration into soil related to the soil tillage intensity. *Soil and Water Research, 2*(1), 15-24. doi:10.17221/2098-SWR
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., & J.J., L. (2009). Forecasting weekly evapotranspiration with ARIMA and artificial neural network models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135*(3), 323-334. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000008
- Lima dos Santos, F. F., de Queiroz, D. M., M. V., D. S., Khorsandi, F., & de Moura Araújo, G. (2023). Analysis of Different Electric Current Frequencies in Soil Apparent Conductivity. *Journal of Biosystems Engineering, 48*, 269–282. doi:10.1007/s42853-023-00187-9
- Machado, F. C., Montanari, R., Shozo Shiratsuchi, L., Lovera, L. H., & De Souza Lima, E. (2015). Spatial Dependence of Electrical Conductivity and Chemical Properties of the Soil by Electromagnetic Induction. *R. Bras. Ci. Solo,, 39*, 1112-1120. doi:10.1590/01000683rbcs20140794
- Mazur, P., Gozdowski, D., Stępień, W., & Wójcik-Gront, E. (2023). Does Drone Data Allow the Assessment of Phosphorus and Potassium in Soil Based on Field Experiments with Winter Rye? *Agronomy, 13*(2). doi:10.3390/agronomy13020446
- McNeill, J. D. (1980). Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low InducInduction. *Technical Note: TN-6. Geonics Limited.*
- McNeill, J. D. (1992). Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. En G. C. Topp, W. D. Reynolds, & R. E. Green (Edits.). Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. Madison : Soil Science Society of America.
- Naderi-Boldaji, M., Sharifi, A., Jamshidi, B., Younesi-Alamouti, M., & Minaee, S. (2011). A dielectric-based combined horizontal sensor for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Sensors and Actuators A: Physical, 171*(2), 131-137. doi:10.1016/j.sna.2011.07.021
- Näsi, R., Mikkola, H., Honkavaara, E., Koivumäki, N., Oliveira, R., Peltonen-Sainio, P., . . . Alakukku, L. (2023). Can Basic Soil Quality Indicators and Topography Explain the Spatial Variability in Agricultural Fields Observed from Drone Orthomosaics? Agronomy, 13(669). doi:10.3390/agronomy13030669

- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods.* Soil Science Society of America. doi:10.2136/sssabookser5.3.c34
- NOOA Physical Sciences Laboratory (PSL). (09 de 03 de 2023). *NOOA Physical Sciencies Laboratory (PSL)*. Recuperado el 2023, de MEI.v2 Values: https://psl.noaa.gov/enso/mei/
- Onsy Mohamed, A.-M., & Paleologos, E. K. (2018). Chapter 16 - Dielectric Permittivity and Moisture Content. En *Fundamentals of Geoenvironmental Engineering. Understanding Soil, Water, and Pollutant Interaction and Transport* (págs. 581-637). doi:10.1016/B978-0-12-804830-6.00016-8
- Orjuela-Matta, H. M., Rubiano-Sanabria, Y., & Camacho-Tamayo, J. H. (2010). Comportamiento de la infiltración en un Oxisol. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgación Científica, 13*(2), 31-39.
- Peña-Beltrán, Z. Y., & Pabón-Caicedo, J. D. (2020). Climatología de las granizadas en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 29*(1), 259-282. doi:10.15446/rcdg.v29n1.75438
- Postolache, S., Sebastião, P., Viegas, V., Postolache, O., & Cercas, F. (2023). IoT-Based Systems for Soil Nutrients Assessment. *Sensors, 23*(1), 1-29. doi:10.3390/s23010403
- Rezaei, A., Karparvarfard, S. H., Naderi-Boldaji, M., Azimi-Nejadian, H., & Tekeste, M. Z. (2022). A new combined penetrometer-dielectric-low frequency acoustic-electrical conductivity sensor for measuring the soil physical characteristics. *Sensors and Actuators A: Physical, 347*. doi:10.1016/j.sna.2022.113952
- Rhoades, J. D., Corwin, D. L., Lesch, & Scott. (1999). Geospatial Measurements of Soil Electrical Conductivity to Determine Soil Salinity and Diffuse Salt Loading from Irrigation. Geophysical Monograph Series. doi:10.1029/GM108p0197
- Sánchez-de Jesús, M. A., Volke-Haller, V. H., Cortés-Flores, J. I., María-Ramírez, A., & San-Martín-Hernández, C. (2024). Aporte de nitrógeno por el suelo y eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno aplicado en maíz de temporal. *Rev. fitotec. mex, 47*(2). doi:10.35196/rfm.2024.2.99
- Schaetzl RJ, T. M. (2015). Basic Concepts: Soil Chemistry. En *In: Soils: Genesis and Geomorphology* (págs. 71-84). Cambridge University Press.
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). *Cation exchange capacity and exchange coefficients. In Methods of Soil Analysis. Part 3—Chemical Methods.* Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America. SSSA Book Series 5. doi:10.2136/sssabookser5.3.c40
- Tang, H., Xie, J., Dou, X., Zhang, H., & Chen, W. (2023). On-Orbit Vicarious Radiometric Calibration and Validation of ZY1-02E Thermal Infrared Sensor. *Remote Sensing, 15*(994). doi:10.3390/rs15040994

Sobre los autores

- **Helber Milton Orjuela Matta**: MSc, Ingeniero Agrícola. Estudiante del Doctorado en Ciencias Agrarias, línea de investigación suelos y aguas. hmorjuelam@unal.edu.co.
- **Christian José Mendoza Castiblanco**: PhD, Ingeniero Agrícola, Doctor en Ciencias Education. Profesor Asistente de Tiempo Completo. cjmendozac@unal.edu.co.
- **Óscar Iván Monsalve Camacho**: PhD, Ingeniero Agrónomo, Doctor en Ciencias Agrarias, línea de investigación suelos y aguas. Profesor hora cátedra. omonsalve@udca.edu.co.

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)