



DIGITALIZACIÓN DE LA AGRICULTURA A PEQUEÑA ESCALA (AgTech 19043)

Producto 3. Nota Técnica Comparativa de Tecnologías Vigentes

Brian S. Caro
Oriana M. Gómez
Luis A. Sandoval
Hugo A. Dorado
Luis A. Muñoz

2022



Códigos JEL: Q16, Q25, N56

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es un mecanismo único de cooperación técnica entre países de América Latina, el Caribe y España, que promueve la competitividad y la seguridad alimentaria. Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), FONTAGRO, de sus Directorios Ejecutivos ni de los países que representan.

El presente documento ha sido preparado por Brian S. Caro, Oriana M. Gómez, Luis A. Sandoval, Hugo A. Dorado y Luis A. Muñoz.

Copyright © 2022 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional. Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Esta publicación puede solicitarse a:

FONTAGRO

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org

www.fontagro.org

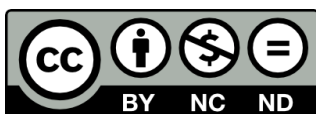


Tabla de Contenidos

Resumen.....	4
Glosario	6
Nota Técnica Comparativa	8
Proceso de búsqueda y selección de tecnología de Visualiti SAS	8
Paso 1. Definición de dimensiones generales de selección.....	10
Pasos 2 y 3. Definición de criterios y rangos de validación	10
Paso 4. Creación de tabla comparativa	12
Paso 5. Descarte general de tecnologías.....	14
Paso 6. Selección de sensores dentro del grupo de factibilidad	14
Paso 7. Tabla comparativa de especificaciones por sensor.....	15
Paso 8. Generación de matriz ponderada	16
Paso 9. Resultado: selección de sensores	16
Conclusiones	20
Referencias Bibliográficas.....	21
Instituciones participantes	22



Resumen

Como parte de las actividades del plan de trabajo del proyecto “Digitalización de la Agricultura de Pequeña Escala”, se ha desarrollado un análisis para comparar las tecnologías actuales de sensores de medición de humedad de suelos agrícolas en términos de precio, componentes y funcionalidad. Este análisis permitió obtener un panorama detallado de las opciones del mercado, además de proporcionar ideas sobre el diseño del sensor de bajo costo, alta robustez y usabilidad propuesto dentro del proyecto; permitiendo la innovación en esta propuesta tecnológica a partir de las tecnologías disponibles. El resultado de este trabajo es el producto número tres del proyecto, titulado: “Nota técnica comparativa de tecnologías de medición de humedad de suelo”.

En el contexto de América Latina y el Caribe, se han puesto a disposición de la agricultura numerosos métodos y tecnologías automatizadas para la medición de humedad del suelo de uso agrícola. Sin embargo, su costo de adquisición y de implementación, y complejidad de uso, hacen que sean poco asequibles para los agricultores de pequeña y mediana escala, especialmente aquellos en el grupo de agricultura familiar de los países del continente. Teniendo en cuenta esta premisa, el proyecto titulado “Digitalización de la agricultura de pequeña escala” propone el desarrollo de una solución tecnológica adaptada para agricultores de pequeña y mediana escala para monitorear la humedad del suelo, que sea de bajo costo, alta usabilidad y robustez.

En conformidad con el objetivo planteado, se considera que la solución tecnológica debe estar compuesta por: 1) un dispositivo robusto y encapsulado, que se pueda enterrar en el suelo, para el registro de datos y el suministro de energía de la sonda de humedad de suelo, 2) una sonda o sensor de humedad donde las características de la tecnología propuesta permitirían sustituir varios de los componentes tradicionalmente usados para almacenamiento y registro de mediciones y 3) un sistema de carga, almacenamiento y administración de energía¹. El único componente por importar es la sonda de humedad y temperatura del suelo. Adicionalmente, la solución tecnológica estará equipada con un sistema de carga de muy bajo consumo, propio de Visualiti SAS, que le permitirá una autonomía en campo mínima de seis meses, sin carga adicional. Los datos almacenados por el dispositivo durante estos meses serán procesados utilizando analítica de datos para alimentar un sistema de información que permitirá a los agricultores definir estrategias óptimas de manejo de cultivo como: fechas de siembra, selección de variedades y prácticas agronómicas climáticamente inteligentes. Se espera que esta tecnología contribuya a facilitar el acceso de medianos y pequeños agricultores a las tecnologías de

¹ La empresa Visualiti SAS, miembro del proyecto, encargada del diseño, desarrollo y réplica de la tecnología, fabrica sus propias tarjetas electrónicas de procesamiento, almacenamiento y carga, y los elementos mecánicos del sistema.



agricultura 4.0 y lograr así un mayor beneficio económico de sus cultivos, adaptación al cambio climático e incentivarlos en el uso de tecnologías digitales como un atractivo para involucrar a más jóvenes en la agricultura, garantizando el relevo generacional al involucrar a los jóvenes en una agricultura inteligente.

El propósito específico de este análisis es realizar un comparativo entre los sensores o sondas de humedad vigentes, que sirven para monitorear el contenido de humedad de suelo (en Honduras, Nicaragua y Colombia), en términos de resolución, exactitud, principio de funcionamiento, rango de medición, tiempo de respuesta, protocolo de comunicación, consumo de energía, método de instalación, dimensiones físicas, material de fabricación, tiempo de vida útil y costo de mantenimiento, para obtener el mejor sensor o sonda a integrar dentro de la solución tecnológica propuesta.

Para el análisis propuesto, se compararon cinco (5) modelos distintos de sensores, ponderando las características señaladas previamente. Se aplicó el método de “matriz ponderada” y así seleccionar los tres sensores con los que es óptimo realizar el desarrollo de la solución planteada en el proyecto “Digitalización de la agricultura de pequeña escala”.

La matriz comparativa de tecnologías fue contrastada con los resultados recopilados de otras investigaciones con este mismo tipo de sensores. En general, se obtiene que las ponderaciones más altas de la matriz corresponden a los sensores que más apuntan al cumplimiento de las premisas básicas (sensor de bajo costo, alta usabilidad y robustez), para lograr el objetivo general planteado por este proyecto, consistente en el desarrollo de una solución tecnológica adaptada a agricultores de pequeña y mediana escala para monitorear la humedad del suelo.

Palabras Clave: Medición de humedad de suelo, sensores para agricultura, comparación de sensores, agricultura de pequeña escala



Glosario

Automatizado: Elemento, herramienta y/o equipo que opera o funciona de forma automática o autónoma, es decir, no requiere de la operación o intervención de una persona para ser encendido, apagado y/o para funcionar de forma continua.

Autonomía energética: Funciona gracias a su propio sistema y/o componente de carga o batería sin necesidad de ser conectado a una fuente de energía externa.

Constante dieléctrica: Es un parámetro físico de los materiales que describe en qué medida son afectados por un campo eléctrico (campo físico representado en determinado espacio o región en el que interactúan fuerzas de origen eléctrico).

Consumo de energía: Cantidad de energía gastada o consumida por un aparato para operar.

Dispositivo: Aparato o equipo.

Encapsulado: Aparato o equipo que contiene en su interior elementos electrónicos para protegerlos de daño físico o corrosión y evacuar el calor generado en su funcionamiento, también permitirle la comunicación con el exterior mediante la conexión de un sensor de medición.

Exactitud: Capacidad de un dispositivo de tomar una medición muy cercana a la real.

Matriz comparativa: Tabla de análisis o comparación.

Principio de funcionamiento: Modo, método o forma en que determinado aparato cumple con su función.

Protocolo de comunicación: Sistema de reglas o método mediante el cual un elemento electrónico o sistémico se comunica con otro.

Prototipado: Proceso utilizado para fabricar el modelo inicial de un producto.

Pruebas piloto: Pruebas preliminares en campo de un equipo electrónico u otro tipo de herramienta.

Rango de medición: Intervalo de valores que determinado sensor es capaz de medir. Ejemplo: sensor de temperatura que mide entre los 0 y los 100 grados centígrados.



Registro de datos: Escritura de datos y mediciones en un elemento físico como una memoria de almacenamiento.

Rentabilidad bruta: Diferencia o resta entre gastos e ingresos.

Resistencia: Oposición o dificultad al paso de la corriente eléctrica.

Resolución: Sensibilidad al cambio o variación de una variable medida por un sensor.

Sonda o sensor: Herramienta de medición de determinada variable como la humedad del suelo.

Tiempo de respuesta: Tiempo que tarda un sensor en tomar una medición y retornar el valor medido a la etapa de registro/almacenamiento.



Nota Técnica Comparativa

Dentro del proyecto “Digitalización de la agricultura de pequeña escala”, se tiene como objetivo el desarrollo de una solución tecnológica adaptada a agricultores de pequeña y mediana escala para monitorear la humedad del suelo. De acuerdo con este objetivo, esta solución debe ser de bajo costo, alta usabilidad y robusta. Teniendo en cuenta estos requisitos, se definen varias actividades dentro de las cuales se encuentra la actividad 1.3 del proyecto: “Análisis de tecnologías disponibles en el mercado que respondan a las necesidades identificadas”, cuyo producto es una “Nota técnica comparativa de tecnologías vigentes que sirven para monitorear la humedad de suelo y tomar decisiones al respecto sobre las características evaluadas”.

El objetivo de esta actividad fue seleccionar los tres sensores disponibles en el mercado más idóneos para integrar dentro de la solución digital a desarrollar en el marco del proyecto, ya que esta solución digital, además del sensor, comprende un registrador de datos, un sistema de carga autónomo y un sistema mecánico protector, componentes que serán diseñados, desarrollados y posteriormente replicados. La elaboración de una nota técnica comparativa requiere efectuar la vigilancia tecnológica y del estado de la técnica en relación con las tecnologías existentes para la medición de la humedad del suelo, mediante un proceso de búsqueda y selección de tecnologías que se describe a continuación.

Proceso de búsqueda y selección de tecnología de Visualiti SAS

Visualiti SAS es una empresa de investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras para la agroindustria. Como organismo co-ejecutor, se encuentra a cargo del diseño y desarrollo de la solución tecnológica. A continuación, se describe el grupo de investigadores, metodología y proceso para realizar el análisis comparativo:

- Equipo de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) de Visualiti SAS:
 - Brian Caro: ingeniero mecatrónico y especialista en automatización industrial, con 6 años de experiencia en desarrollo de sistemas electrónicos de carga solar y fabricación modular de equipos de monitoreo agrícola.
 - Laura Gómez: ingeniera telemática, especialista en comunicación IP y estudiante de maestría en gerencia de proyectos, con 7 años de experiencia en redes de sensores inalámbricos.
 - Juan David Sánchez: tecnólogo electrónico con 3 años de experiencia en electrónica de señales (calibración y validación).



- Metodología: metodología general de I+D+i de tecnología de Visualiti SAS, cuyo objetivo es proporcionar un modelo efectivo y formal para gestionar, medir y mejorar continuamente el proceso de la investigación, el desarrollo y la innovación llevado a cabo por la unidad de I+D+i de la empresa, alineada a cada proyecto de innovación ejecutado por la misma (Figura 1).



Figura 1. Metodología de Investigación Desarrollo e innovación propia de Visualiti SAS.
Fuente: Propia.

- Proceso: Vigilancia tecnológica profunda y selección de la tecnología (paso 3 de la metodología descrita en la Figura 1 y detallado en la Figura 2).



Figura 2. Proceso de búsqueda tecnológica profunda y selección de tecnologías (paso 3 de la metodología).

Fuente: Propia.

Teniendo claro el equipo de investigadores, metodología y proceso, a continuación, se describen los pasos de la metodología de I+D+i de Visualiti SAS y los resultados obtenidos (Paso 3 de la metodología).

Paso 1. Definición de dimensiones generales de selección

De conformidad con el objetivo del proyecto, se definieron tres dimensiones fundamentales para el análisis comparativo:

- 1) Dimensión Económica: bajo costo con respecto a las tecnologías disponibles en el mercado
- 2) Dimensión Técnica: alta usabilidad, que permita que la solución tecnológica pueda ser utilizada en una gama amplia de cultivos y tipos de suelo.
- 3) Dimensión Mecánica: alta robustez, que permita que la solución tecnológica pueda soportar uso cotidiano y condiciones climáticas adversas sin dañarse o requerir mantenimiento frecuentemente.

Con las dimensiones definidas, se realizó un análisis comparativo que permitió identificar de manera acertada, las tecnologías vigentes que mejor se adaptan a ellas.

Pasos 2 y 3. Definición de criterios y rangos de validación

Teniendo en cuenta que el paso 1 del proceso ilustrado en la figura 1, correspondiente con la definición de las dimensiones de evaluación, fue realizado en la etapa de formulación del proyecto, se procede con el paso 2 y 3. Estos pasos implican establecer criterios detallados de evaluación, para lo cual el equipo técnico definió 24 criterios, subdivididos en las tres dimensiones



de selección en el paso previo (paso 1), para realizar una evaluación objetiva en cada dimensión planteada y establecer los rangos de validación para cada criterio:

Criterios para evaluar la **dimensión económica: garantizar el bajo costo (del 1 al 3)**

1. **Costo unitario:** teniendo como base el salario mínimo mensual legal vigente en 2021 en los países involucrados en el estudio, Honduras, Nicaragua y Colombia, que corresponde a US\$ 395 en el caso de Honduras, US\$ 123 para Nicaragua y US\$ 258 en Colombia, se obtuvo un promedio de US\$ 258.6, el cual se fija como costo máximo de la tecnología para el usuario final.
2. **Costo de instalación:** dado que la instalación de un dispositivo de medición de humedad suele tardar entre 3 y 4 horas continuas, y debe ser efectuada por un técnico o asistente de campo que reciba remuneración equivalente al salario mínimo legal vigente de cada país, el costo promedio de la instalación en campo se estima en US\$ 6.00, sin contar con los costos de desplazamiento y otros costos logísticos.
3. **Costo de mantenimiento anual:** la tecnología permanecerá instalada en campo sin perturbaciones durante un período mínimo de seis meses continuos. Al final de este periodo, se extraerá de campo y se deberá realizar su inspección y mantenimiento. Esta tarea se tarda en promedio 4 horas y comprende la extracción de datos, la revisión de la tarjeta registradora, la inspección de estado de los componentes mecánicos y electrónicos de la tecnología, limpieza de componentes, limpieza de la sonda de medición de humedad de suelo, registro fotográfico y el diligenciamiento de formatos. Esta labor puede ser realizada por un técnico o asistente de campo que reciba remuneración equivalente al salario mínimo legal vigente de cada país, equivalente a US\$ 6.00, sin contar con los costos de desplazamiento y otros costos logísticos.

Criterios para evaluar la **dimensión técnica: garantizar alta usabilidad (del 4 al 19)**

4. **Autonomía de carga:** duración en campo de mínimo 6 meses sin necesidad de recarga. Es decir, un requerimiento entre 3000mAh y 5600mAh.
5. **Consumo de energía:** para satisfacer la autonomía de carga establecida en el criterio 4, debe estar entre 0,7mAh y 1mAh.
6. **Voltaje de trabajo:** debe ser compatible con los requerimientos de energía de la tecnología, obteniendo un rango de entre 1,5V y 4,2 Voltios.
7. **Tiempo de respuesta:** menor a 20 ms.
8. **Tipo de comunicación:** (1) encriptado, (2) no estandarizado, (3) resistivo, (4) voltaje, o (5) digital.
9. **Unidad de medida:** kilo pascales (kPa) o contenido volumétrico de agua (%), para ser fácilmente interpretado por la población objetivo.
10. **Resolución:** debe detectarse la variación del valor en unidades de mínimo de 1 kPa y máximo de 2 kPa, donde el valor ideal es 1 kPa, para garantizar la calidad de las



observaciones.

11. **Exactitud:** el rango de desviación de la medición debe ser igual o menor a (+/-) 3%, donde el valor ideal es de (+/-) 1% para garantizar la confiabilidad de las muestras.
12. **Principio de funcionamiento:** todos aplican
13. **Rango de medición:** para contenido volumétrico de agua, de 0 a 100%; para kilopascales, de 0 a 100 kPa.
14. **Elementos adicionales:** no debe requerir más que un circuito simple de acondicionamiento de señal electrónica proveniente del sensor (en voltaje).
15. **Complejidad de la implementación:** no se debe requerir de herramienta especializada, conexiones eléctricas, ni conocimientos avanzados para su instalación, para que idealmente se invierta máximo 60 minutos en su instalación.
16. **Desventajas:** se debe contar y enumerar las desventajas encontradas para cada sensor, no deben superar 3 desventajas y ninguna debe ser sobre consumo ni exactitud.
17. **Fallas comunes:** no debe descalibrarse con facilidad, no debe ser sensible a la manipulación normal de la instalación y no debe requerir mantenimiento en un periodo de mínimo de 180 días.
18. **Método de instalación:** debe ser manual y apoyarse de herramientas básicas.
19. **Documentación:** debe existir por lo menos 3 artículos o proyectos de investigación y desarrollo con resultados positivos con respecto al sensor.

Criterios para evaluar la **dimensión mecánica: garantizar robustez (del 20 al 24)**

20. **Material:** debe ser plástico de ingeniería, acero inoxidable o resinas de alta dureza.
21. **Resistencia:** Debe estar entre el grado IP68 y el IP69.
22. **Tipo de conexiones:** Deben ser conexiones IP69 (sumergibles).
23. **Tamaño:** Entre mínimo 10 cm y máximo 30 cm y un diámetro máximo de 15 cm.
24. **Vida útil:** mínima de 12 meses.

Paso 4. Creación de tabla comparativa

En correspondencia al **paso 4**, del proceso de búsqueda y selección de tecnologías, se muestran los 24 criterios definidos y los rangos de valor mínimos, máximos e ideales requeridos para cada uno de ellos (Tabla 1).



Tabla 1. Criterios de selección de las tecnologías a comparar.

Criterio	Unidad	Valor mínimo	Valor máximo	Valor ideal
1. Costo unitario	USD	35	172	60
2. Costo instalación	USD	3	6	3
3. Costo mantenimiento	USD	10	36	10
4. Autonomía de carga	mAh	3000	5600	3600
5. Consumo de energía	mAh	0.7	1	0.7
6. Voltaje de trabajo	V	1.5	4.2	1.5
7. Tiempo de respuesta	min	0	20	3
8. Tipo de comunicación	lectura	Análoga	Digital	Digital (SDI)
9. Unidad de medida	Tipo	-	-	kPa
10. Resolución	% o kPa de acuerdo con la sonda seleccionada.	1	2	1 / 1
11. Exactitud	(+/-) %	1	3	1
12. Principio de funcionamiento	tipo	Todos	todos	tensiométrico
13. Rango de medición	% o kPa de acuerdo con la sonda seleccionada.	0 a -100	0 a -200	0 a -100
14. Elementos adicionales	Cant.	1	10	3
15. Complejidad implement.	Clase	Muy Baja	Media	Muy Baja
16. Desventajas	Cant.	0	3	0
17. Fallas comunes	Cant.	0	3	0
18. Método de instalación	Tiempo (h)	0.5	3	1
19. Documentación	No. artículos	3	-	3
20. Material	Idoneidad	3	5	5
21. Resistencia	Cat. IP	68	69	69
22. Tipo de conexiones	Cat. IP	-	-	69
23. Tamaño	mm	-	24	18
24. Vida Útil	Mes	6	-	36

Fuente: elaboración propia



Paso 5. Descarte general de tecnologías

El proceso de descarte tiene como propósito identificar y excluir principios de funcionamiento y tecnologías que presenten elementos opuestos a la premisa del proyecto, esto decir, aquellas cuyas características fueran alto costo, complejidad de uso y poca o ninguna garantía de durabilidad. Al finalizar el proceso de descarte, se identificaron las siguientes tecnologías no factibles:

- Con respecto a alto costo: transferencia de calor, sonda radioactiva, y sensores de lectura de potencial mátrico de valor por encima de los US\$ 200.
- Con respecto a complejidad: cámara multispectral, dron de toma de imágenes, monitoreo satelital.
- Con respecto a baja robustez: Sensores de humedad de suelo sin protección electrónica o de tipo cartucho descartable.

Paso 6. Selección de sensores dentro del grupo de factibilidad

Finalizado el proceso de descarte de los principios de funcionamiento (paso 5), se determinaron los siguientes principios de funcionamiento como tecnologías **factibles** (paso 6 del proceso), a considerar en la etapa de comparación:

- **Reflectómetro de Dominio de Frecuencia (FDR por sus siglas en inglés):** este tipo de principio de funcionamiento, como lo expresa Sample et al. (2016), utiliza el suelo como un condensador que almacena parte de una carga eléctrica que circula a través de dos o más electrodos insertados en el suelo, generando cambios en la frecuencia de la onda presente, a medida que pasa la misma a través del suelo. Esta medida está directamente relacionada con la capacitancia y las propiedades dieléctricas del suelo. Por lo tanto, se tiene que a mayor frecuencia, mayor humedad del suelo.

Los sensores tipo FDR seleccionados para realizar la comparación son aquellos cuyo valor no excedió US\$ 172. Estos son: Cap-V1 (Genérico), SW-10 (PinoTech), VH-400 (Vegetronix), ECH20-EC5 (Meter).

- **Matriz granular (GM por sus siglas en inglés):** este tipo de sensor, de acuerdo con Sample et al. (2016), consta de electrodos contenidos en una matriz granular que está encerrada dentro de una solución de yeso, una membrana y una caja de metal. Se coloca una pequeña carga en los electrodos y se mide la resistencia eléctrica a través del sensor. Este tipo de sensor simula el proceso de absorción de agua de las plantas, donde a medida que la humedad del suelo disminuye, aumenta la resistencia.

El sensor tipo GM seleccionado para realizar la comparación es el SS200 (Irrometer Company,



Inc), cuyo valor no excede US\$ 172.

Paso 7. Tabla comparativa de especificaciones por sensor

A partir del paso 6, de selección de sensores en el grupo de factibilidad, se identificó cinco sensores para continuar con los siguientes pasos. A continuación, se detallan las **especificaciones de cada sensor seleccionado, con respecto a los criterios establecidos** (Tabla 2).

Tabla 2. Sensores factibles y especificaciones del fabricante por criterio

Criterio / Sensor	Cap-V1	SS200	SW-10	VH-400	ECH20-EC5
1. Costo unitario	14.2	64.17	41.05	28.91	171.7
2. Costo instalación	3	4	3	3	3
3. Costo mantenimiento	20	30	10	10	10
4. Autonomía de carga	3600	3600	3600	3600	3600
5. Consumo de energía		100 mA	24 mA	13 mA	20 mA
6. Voltaje de trabajo	3.3 – 5.5		3.1 - 5	3.5 a 20	2.5 – 3.6
7. Tiempo de respuesta	nd	60 ms	nd	400 ms	100 ms
8. Tipo de comunicación	Voltaje	Resistencia	Voltaje	Voltaje	Voltaje
9. Unidad de medida	WCV	kPa	WCV	WCV	WCV
10. Resolución	nd	nd	nd	nd	0,001 m3/m3
11. Exactitud	nd	nd	nd	2%	2%
12. Principio de funcionamiento	FDR	GM	FDR	FDR	FDR
13. Rango de medición	0 - 100	0 - 200	0 - 100	0 - 100	0 - 100
14. Elementos adicionales	3	6	1	1	1
15. Complejidad implement.	media	alta	baja	media	baja
16. Desventajas	9	6	3	4	2
17. Fallas comunes	10	6	nd	5	nd
18. Método de instalación	2	2	1	2	1
19. Documentación	6	6	6	3	9
20. Material	1	4	4	3	5
21. Resistencia	IP32	IP68	IP68	IP68	IP68
22. Tipo de conexiones	IP32	IP32	IP32	IP32	IP32
23. Tamaño	98x23x4	22x22x83	170x25x15	133x12x21	89x18x7
24. Vida Útil	nd	1	1	1	1

Fuente: elaboración propia a partir de especificaciones de las fichas técnicas de los sensores (Meter Group, 2019; Irrrometer Company INC, 2021; Pino Tech, 2018)

*nd = no disponible.



Paso 8. Generación de matriz ponderada

En este paso, el equipo de trabajo asignó una calificación entre 1 y 5 a cada sensor en los criterios establecidos, donde el valor de 1 corresponde al no cumplimiento con el valor mínimo dado al criterio y el valor de 5 corresponde al total cumplimiento con el valor ideal. El producto de este procedimiento es la **tabla 3 de calificaciones o matriz ponderada resultante (paso 8 del proceso)**, (Tabla 3.)

Tabla 3. Matriz ponderada de la calificación de los sensores

Criterio / Sensor	Cap-V1	SS200	SW-10	VH-400	ECH20-EC5
1. Costo unitario	5	3	3	3	2
2. Costo instalación	2	4	5	5	5
3. Costo mantenimiento	2	4	5	5	5
4. Alimentación	2	3	3	3	4
5. Consumo de energía	3	3	3	3	3
6. Voltaje de trabajo	2	4	3	3	4
7. Tiempo de respuesta	3	4	3	3	3
8. Tipo de comunicación	3	3	3	3	3
9. Unidad de medida	3	3	3	3	3
10. Resolución	2	4	4	3	4
11. Exactitud	1	5	4	3	4
12. Principio de funcionamiento	4	4	4	4	4
13. Rango de medición	3	5	4	4	5
14. Elementos adicionales	5	3	5	5	5
15. Complejidad implement.	3	3	4	4	4
16. Desventajas	1	3	4	2	4
17. Fallas comunes	1	3	4	2	5
18. Método de instalación	3	4	5	5	5
19. Documentación	3	5	4	3	5
20. Material	1	4	3	3	3
21. Resistencia	1	4	3	3	3
22. Tipo de conexiones	2	2	2	2	3
23. Tamaño	4	4	4	4	4
24. Vida Útil	1	3	4	4	4

Fuente: elaboración propia.

Paso 9. Resultado: selección de sensores

Finalmente, se realizó la sumatoria de calificaciones individuales para obtener el valor final de



cada alternativa y así seleccionar los tres sensores con las calificaciones más altas. De esta forma, se finaliza el **paso 9** del proceso de **selección de tecnología** (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la calificación y selección de tres alternativas.

Calificación / Sensor	Cap-V1	SS200	SW-10	VH-400	ECH20-EC5
Calificación (suma)	189	272	280	259	294

A partir de la suma de calificaciones de cada sensor se seleccionan los siguientes como los sensores a validar en la etapa de diseño, prototipado y pruebas de campo de la solución tecnológica:

1. **Sensor ECH20-EC5:** de acuerdo con su fabricante, Meter Group (2019), el EC5 determina el contenido volumétrico de agua (VWC) midiendo la constante dieléctrica del medio usando tecnología de dominio de capacitancia / frecuencia. Su frecuencia de 70 MHz minimiza los efectos de salinidad textura, lo que hace que este sensor sea preciso en casi cualquier suelo. Se incluyen calibraciones de fábrica para suelos minerales, suelos para macetas, lana de roca y perlita (Ilustración 1).



Ilustración 1. Imagen de referencia del sensor EC5

Fuente: Meter Group (2019)

2. **Sensor SW-10:** permite medir el contenido relativo de agua en el suelo, según el fabricante, Pino Tech (2018), este sensor es superior a los sensores resistivos de humedad del suelo. En su diseño no hay electrodos expuestos que se corroan en pocas semanas. Además, las lecturas casi no se desviarán con el tiempo o con los cambios de temperatura. Brinda las mismas lecturas independientemente del voltaje de suministro. Es impermeable y resistente a la intemperie. Se puede enterrar en el suelo durante un período de tiempo prolongado sin efectos adversos en la precisión (Ilustración 2).



Ilustración 2. Imágen de referencia del sensor Soil Watch 10
Fuente: Pino Tech (2018)

3. **Sensor SS200:** Según su fabricante, Irrrometer Company Inc (2021), es un dispositivo resistente que responde a los cambios en la humedad del suelo. Una vez plantado en el suelo, intercambia agua con el suelo circundante por lo tanto se mantiene en equilibrio con él. El agua del suelo es un conductor eléctrico y en consecuencia proporciona una indicación relativa del estatus de humedad del suelo. A medida que el suelo se seca, el agua es extraída del sensor y se incrementa la medida de la resistencia. Por el contrario, cuando el suelo es rehumedecido, la resistencia disminuye (Ilustración 3).



Ilustración 3. Imágen de referencia del sensor SS200
Fuente: Irrrometer Company, Inc, (2021)

A continuación, se muestra el gráfico comparativo de resumen, el cual permite comparar los sensores en las tres dimensiones establecidas (Gráfico 1).

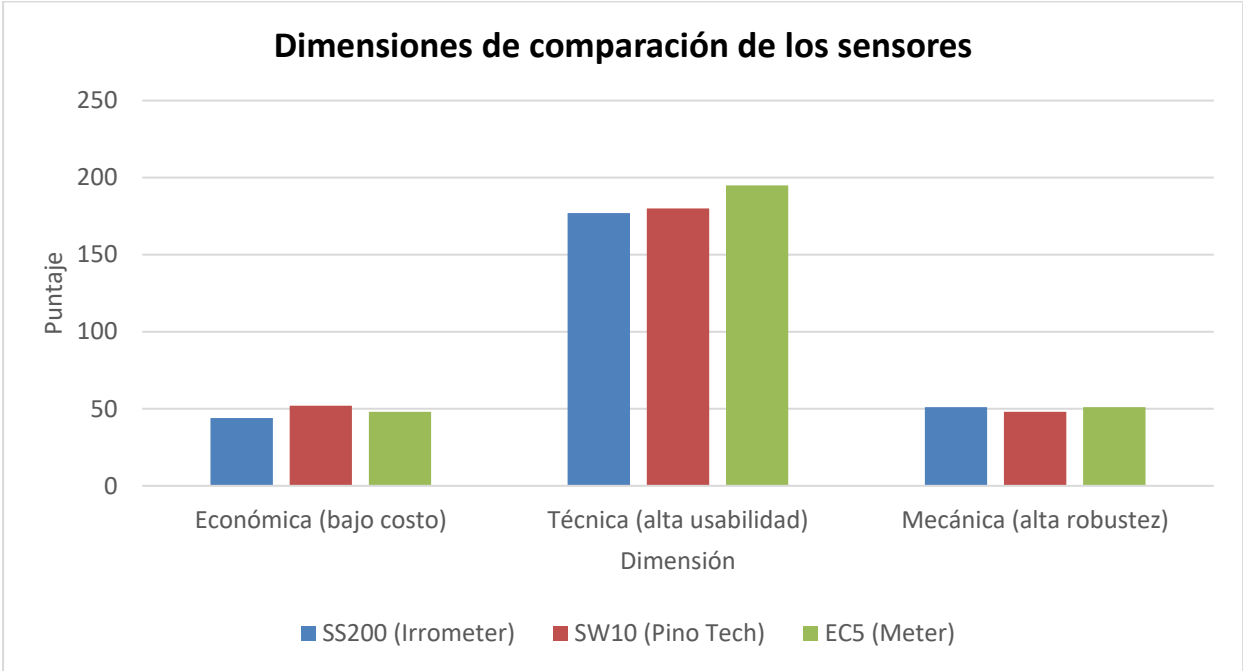


Gráfico 1. Comparativa en las 3 dimensiones de los sensores seleccionados para el desarrollo de la solución tecnológica.



Conclusiones

En conformidad con la investigación y vigilancia tecnológica de los sensores de humedad de suelo expuestos en este análisis, los sensores de principio de funcionamiento FDR y GM son los sensores que mejor se adaptan a la relación costo/beneficio/especificaciones requeridas para el desarrollo de este proyecto y la etapa de sostenibilidad de este.

Los sensores seleccionados (ECH20-EC5, SW-10 y SS200) son compatibles con los requerimientos de bajo consumo y alta robustez para la tecnología propuesta, asegurando su integración con los demás componentes electrónicos, esto permite dos cosas, por una parte, comprobar la hipótesis del proyecto, en la que se planteó obtener una solución tecnológica adaptada a agricultores de pequeña y mediana escala en Colombia, Honduras y Nicaragua, para monitorear la humedad del suelo de bajo costo, por otra parte, desarrollar una tecnología encapsulada para enterrar completamente en el suelo, donde radica la principal diferencia con respecto a las tecnologías tradicionalmente usadas para la medición, almacenamiento y registro de mediciones, las cuales son de dimensiones y características mecánicas que no permiten su funcionamiento e implementación bajo tierra.

El costo de la tecnología de medición de humedad del suelo oscilaría entre US\$ 85 y US\$ 254, como precio de venta unitario mínimo y máximo respectivamente. Esta variación surge de los costos individuales de los sensores a integrar con el componente de almacenamiento/registro de datos y la fuente de alimentación de energía. La selección final del sensor dependerá de los resultados de las pruebas piloto de la tecnología que serán llevadas a cabo en campo con estos tres sensores y sus respectivos encapsulados de almacenamiento y alimentación bajo tierra.

Es pertinente aclarar que existe la posibilidad de generar una tecnología de medición de humedad de suelo de menor costo que el rango anteriormente expresado, integrando el sensor genérico que fue también evaluado. En este caso, el precio de venta de la tecnología de medición estaría en alrededor de US\$ 35. Sin embargo, este no fue satisfactorio en los criterios de exactitud y robustez (dentro de las dimensiones técnica y mecánica) establecidos.



Referencias Bibliográficas

- Evelt, Steve (2000). "Some Aspects of Time Domain Reflectometry (TDR), Neutron Scattering, and Capacitance Methods of Soil Water Content Measurements". Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228693580_Some_aspects_of_time_domain_reflectometry_TDR_neutron_scattering_and_capacitance_methods_of_soil_water_content_measurement.
- Long He, Daniel Weber (2021). "Monitoring Soil Moisture Level for Precision Irrigation in Apple Orchards" Penn State University. Art. 5981.
- Irrrometer Company Inc. (2021). "SENSOR DE HUMEDAD DEL SUELO WATERMARK MODELO 200SS". Irrrometer Sensors. Recuperado de <https://www.irrometer.com/pdf/sensors/403SP%20WATERMARK%20Sensor-WEB.pdf>.
- Meter Group (2018). "TEROS11 12 Manual Web". Meter Manuals. Recuperado de http://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf.
- Meter Group (2018). "TEROS10 Manual Web". Meter Manuals. Recuperado de http://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf.
- Meter Group (2019). "EC-5 User Manual". Meter Manuals. Recuperado de http://publications.metergroup.com/Manuals/20431_EC-5_Manual_Web.pdf.
- Meter Group (2020). "TEROS21 Gen2 Manual Web". Meter Manuals. Recuperado de http://library.metergroup.com/Manuals/20854_TEROS21_Gen2_Manual_Web.pdf
- Meter Group (2021). "Using soil moisture sensors to improve irrigation of peanuts, cotton, and corn". Recuperado de <https://www.metergroup.com/environment/articles/using-soil-moisture-sensors-to-improve-irrigation-of-peanuts-cotton-and-corn/>
- Pino Tech (2018). "Soilwatch 10". Pino Tech Sensors. Recuperado de <https://pino-tech.eu/wp-content/uploads/2017/08/SoilWatch10.pdf>.
- Sample, D.J., Owen, J.S., Fields, J.S. y Barlow, S (2016). "Understanding Soil Moisture Sensors: A Fact Sheet for Irrigation Professionals in Virginia". Virginia Tech. Volumen (BSE-198P), pp. 3-6.



Instituciones participantes



Alliance



Secretaría Técnica Administrativa



Con el apoyo de:



www.fontagro.org

Correo electrónico: fontagro@fontagro.org