

Distributed Environmental and Edaphic Monitoring System for Olive Orchards Based on IoT and LoRaWAN

Pablo Sebastian Rosales¹, Nadia Soledad Arias^{2,4}, Carlos Manuel De Marziani^{1,3}, Fabián Gustavo Scholz^{2,4}, Matías Javier Micheletto³, and Samuel Ezequiel Pérez¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia, Argentina

prosales@unpata.edu.ar, marziani@unpata.edu.ar, samuelperez737@gmail.com

² Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia, Argentina
ns_arias@yahoo.com.ar, fgsscholz@yahoo.com

³ Instituto Multidisciplinario para la Investigación y el Desarrollo Productivo y Social de la Cuenca Golfo San Jorge (IIDEPyS-GSJ), CONICET–UNPSJB, Comodoro Rivadavia, Argentina
matias.micheletto@uns.edu.ar

⁴ Instituto de Biociencias de la Patagonia (INBIOP), CONICET–UNPSJB, Comodoro Rivadavia, Argentina

Abstract. Olive production in arid and cold regions such as Argentine Patagonia faces challenges associated with microclimatic and edaphic variability that directly impact crop physiology and water use efficiency. In this context, the availability of plant-scale information is key for agronomic decision-making, although continuous monitoring infrastructure adapted to these conditions remains limited. This paper presents advances in the development of a distributed environmental and edaphic monitoring system based on IoT and LoRa/LoRaWAN for olive orchards in Comodoro Rivadavia. The system integrates a central meteorological station with a network of low-power nodes at the plant level, built around the Heltec WiFi LoRa 32 V3 microcontroller (ESP32-S3) with DHT22, DS18B20, and the METER EC-5 capacitive sensor for volumetric water content. A prototype was validated over three months at the demonstrative plot of the Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), accumulating over 107,000 records. An initial linear adjustment for the EC-5 sensor was obtained against a handheld reference reader, reducing the measurement RMSE from 64.6% to 5.8%. As the main contribution, this work proposes a scalable monitoring architecture for extreme environmental conditions and produces the first continuous plant-scale dataset for olive cultivation in the region, providing a foundation for ecophysiological analysis and efficient irrigation management.

Keywords: agricultural monitoring · IoT · LoRaWAN · olive cultivation · eco-physiology

Sistema de monitoreo ambiental y edáfico distribuido para plantaciones de olivo basado en IoT y LoRaWAN

Abstract. La producción de olivo en regiones áridas y frías como la Patagonia argentina presenta desafíos asociados a la variabilidad microclimática y edáfica que impactan directamente en la fisiología del cultivo y en la eficiencia del uso del agua. En este contexto, la disponibilidad de información a escala de planta resulta clave para la toma de decisiones agronómicas, aunque existe una limitada infraestructura de monitoreo continuo adaptada a estas condiciones. En este trabajo se presentan los avances en el desarrollo de un sistema distribuido de monitoreo ambiental y edáfico basado en IoT y LoRa/LoRaWAN para plantaciones de olivo en Comodoro Rivadavia. El sistema integra una estación meteorológica central con una red de nodos de bajo consumo a nivel de planta, basados en el microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32-S3) con sensores DHT22, DS18B20 y el sensor capacitivo METER EC-5 para contenido volumétrico de agua. Un prototipo fue validado durante tres meses en la parcela demostrativa de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), generando más de 107.000 registros. Se obtuvo un ajuste lineal inicial para el sensor EC-5 frente a un lector de referencia manual, reduciendo el RMSE de medición de 64,6% a 5,8%. Como principal contribución, el trabajo propone una arquitectura escalable para condiciones ambientales extremas y genera el primer conjunto de datos continuo a escala de planta para olivicultura en la región, constituyendo una base para el análisis ecofisiológico y la gestión eficiente del riego.

Keywords: monitoreo agrícola · IoT · LoRaWAN · olivicultura · ecofisiología

1 Introducción

La producción de olivo (*Olea europaea* L.) en la Patagonia Central Argentina presenta desafíos ecofisiológicos que dependen de condiciones microambientales específicas a escala de planta. La caracterización precisa de variables como temperatura del aire y del suelo, contenido de agua en el suelo y radiación solar resulta fundamental para optimizar prácticas de manejo de riego (Arias et al., 2015, 2021). Sin embargo, existe una disponibilidad limitada de sistemas de monitoreo continuo con granularidad fina adaptados a estas condiciones. Las tecnologías IoT y protocolos como LoRa/LoRaWAN emergieron como soluciones promisorias para el monitoreo distribuido en sistemas agrícolas (Farooq et al., 2019; Pivoto et al., 2021), permitiendo redes de sensores con elevada autonomía energética. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo distribuido para plantaciones de olivo desplegado en la parcela experimental del Grupo de Estudios Biofísicos y Fisiológicos (GEBEF, UNPSJB–CONICET) en Comodoro Rivadavia, junto con el primer conjunto de datos continuo a escala de planta para olivicultura en la región y un procedimiento de ajuste para sensores de humedad de suelo.

2 Arquitectura del sistema

2.1 Estación meteorológica central

La estación registra variables climáticas zonales de manera autónoma: temperatura y humedad del aire y del suelo. Se ha diseñado para incrementar sus capacidades de sensado incorporando próximamente medición de velocidad y dirección del viento, precipitación y un sensor de radiación PAR, relevante para el análisis ecofisiológico del olivo.

2.2 Nodos de monitoreo a nivel de planta

Los nodos permiten medir y registrar variables relacionadas con condiciones micro-climáticas y edáficas a nivel de planta individual, posibilitando caracterizar la variabilidad espacial del cultivo. Cada nodo está basado en el Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32-S3 con módulo SX1262) e integra: sensor DHT22 para medir temperatura y humedad del aire; sensor DS18B20 para medir temperatura del suelo; y sensor capacitivo METER EC-5 para medir contenido volumétrico de agua (VWC). El diseño incorpora gestión de bajo consumo y almacenamiento local en SD. En la evolución planificada, el EC-5 será reemplazado por el sensor METER TEROS 12, que mide simultáneamente VWC, temperatura y conductividad eléctrica con calibración universal más robusta; asimismo se evaluará la incorporación de sensores de temperatura y humedad del aire de mayor estabilidad y precisión (p. ej. Sensirion o Vaisala) en sustitución del DHT22.

2.3 Comunicación LoRa/LoRaWAN

La comunicación se implementa mediante LoRa (>2 km en campo abierto, consumo mínimo). El sistema inició con LoRa punto a punto con integración WiFi posterior. La evolución contempla LoRaWAN completo con gateway dedicado para mayor escalabilidad y gestión remota.

3 Prototipo y resultados preliminares

El prototipo opera de forma continua desde enero de 2026 en la parcela demostrativa de olivo del GEBEF, acumulando más de 107.000 registros en tres meses. Las series muestran la transición verano–otoño: temperaturas del aire entre 5,7 °C y 39,6 °C (media 18,9 °C) y humedades relativas entre 9,9% y 99,9% (media 43,1%) (Fig. 1). Los datos son accesibles en tiempo real en <https://gipis.unp.edu.ar/weather>.

3.1 Ajuste preliminar del sensor EC-5

Se realizó una comparación directa entre las lecturas del sensor EC-5 y un lector de referencia portátil ProCheck (METER Group), un dispositivo de mano para la verificación puntual de sensores de humedad de suelo, bajo cuatro condiciones controladas: tierra húmeda, superficie seca con riego subsuperficial, suelo inundado y agua en drenaje

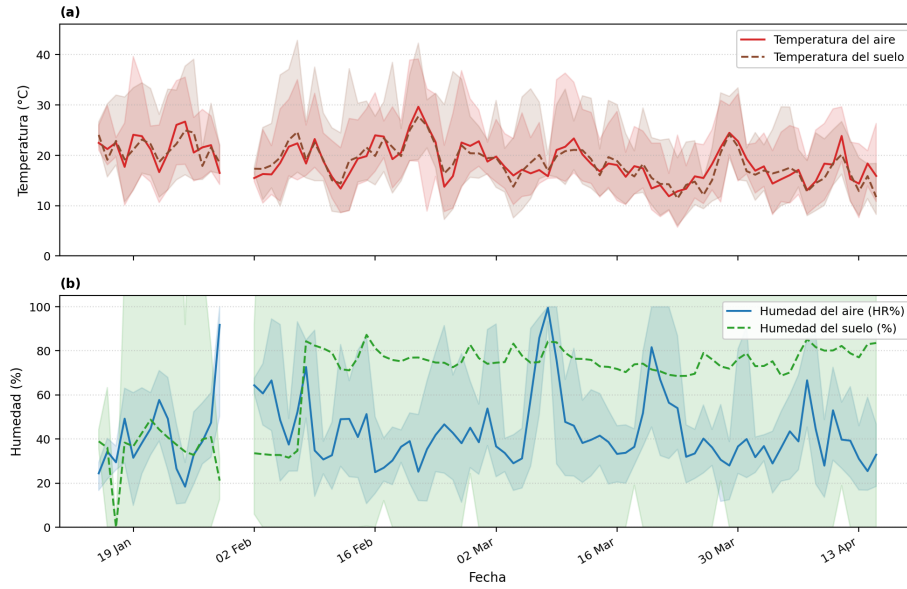


Fig. 1: Series temporales diarias (enero–abril 2026). (a) Temperatura del aire (DHT22) y del suelo (DS18B20); bandas: rango diario mínimo–máximo. (b) Humedad relativa del aire (DHT22) y VWC del suelo (EC-5).

($n = 26$ pares de medición). Cabe señalar que estas condiciones se concentran en dos rangos extremos de humedad (aproximadamente 15–20% y 38–42% VWC), sin cobertura continua del rango intermedio, lo cual constituye una limitación de este ensayo preliminar.

Se observó una correlación positiva y significativa entre ambos sensores ($r = 0,89$, $r^2 = 0,79$, $p < 0,001$), pero con un offset sistemático elevado: el EC-5 sobreestima consistentemente el VWC respecto a la referencia en todas las condiciones evaluadas. Este comportamiento es esperable cuando la curva de calibración de fábrica no representa las propiedades dieléctricas del suelo específico del sitio. A partir de la regresión lineal ($EC-5 = 1,11 \cdot VWC_{ref} + 61,0$), se obtuvo el siguiente ajuste por inversión:

$$VWC_{ajustado} (\%) = \frac{VWC_{EC5} - 61,0}{1,11} \quad (1)$$

El ajuste reduce el RMSE de 64,6% a 5,8% (MAE = 5,1%; sesgo = 0,0%). Si bien esto representa una mejora sustancial respecto a la lectura sin corregir, un RMSE de 5,8% sigue siendo elevado para un sensor capacitivo de este tipo, para el cual una calibración específica de sitio bien lograda permite alcanzar errores menores al 1%. Por lo tanto, este resultado debe interpretarse como un ajuste preliminar y no como una calibración definitiva, dado además el rango acotado de condiciones de humedad cubiertas por el ensayo. La validación cruzada *leave-one-out* (RMSE-LOO = 6,4%) indica que el modelo es estable dentro de ese rango, pero no sustituye una calibración in-situ con mediciones que cubran de forma más homogénea todo el rango de humedad, desde la saturación hasta la sequedad (Fig. 2). Este resultado preliminar fundamenta la migración

planificada al sensor METER TEROS 12 y establece la necesidad de una calibración específica de sitio, más exhaustiva, tanto para el EC-5 como para su reemplazo.

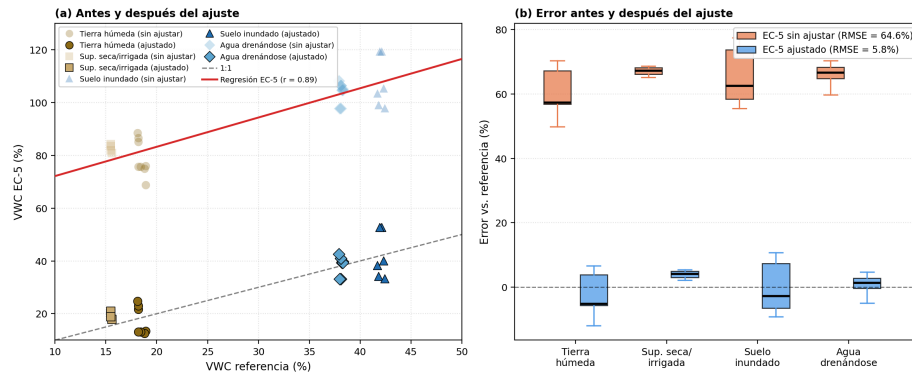


Fig. 2: Ajuste preliminar del sensor EC-5 frente al lector de referencia ProCheck ($n = 26$) bajo cuatro condiciones de humedad de suelo controladas. (a) Valores de VWC sin ajustar (símbolos semi-transparentes) y ajustados (símbolos sólidos con borde) según $VWC_{ajustado} = (EC5 - 61,0)/1,11$; línea roja: regresión lineal del EC-5 sin ajustar ($r = 0,89$); línea punteada: relación 1:1. (b) Distribución del error residual (EC-5 – referencia) antes y después del ajuste, por condición; el RMSE se reduce de 64,6% a 5,8%.

4 Trabajo futuro

El trabajo en curso contempla la evolución del prototipo hacia una solución de instrumentación de campo robusta y escalable. En términos de hardware, se prevé el diseño de una PCB definitiva con mejoras en la gestión energética y la confiabilidad mecánica para operación prolongada bajo condiciones patagónicas, así como la evaluación de sensores de aire de mayor estabilidad en reemplazo del DHT22. La estación meteorológica central incorporará próximamente instrumentación de viento completa y un sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR), ampliando las variables disponibles para el análisis ecofisiológico.

En cuanto a la medición del contenido de agua en el suelo, se planifica el reemplazo del sensor EC-5 por el METER TEROS 12, junto con una calibración in-situ más exhaustiva, basada en mediciones que cubran de forma homogénea todo el rango de humedad, que permita alcanzar errores de medición acordes a las capacidades del sensor.

El sistema será desplegado en escala comercial en el emprendimiento olivícola EOLOVita (Comodoro Rivadavia), con una red de nodos distribuidos a nivel de planta y comunicación LoRaWAN mediante gateway dedicado. Se prevé además documentar y ampliar el dashboard de visualización y análisis de datos de la plataforma web. Los datos generados permitirán abordar el análisis ecofisiológico del cultivo, identificando relaciones entre las condiciones ambientales y edáficas y la respuesta del olivo, con especial énfasis en la optimización del manejo del riego (Arias et al., 2021; Scholz et al., 2012).

5 Conclusiones

Se presentó el desarrollo en curso de un sistema IoT de monitoreo ambiental y edáfico para olivicultura patagónica, que distingue arquitecturalmente entre escala zonal (estación meteorológica) y escala de planta (nodos distribuidos). El prototipo operativo acumula más de 107.000 registros en tres meses, valida la arquitectura propuesta y genera el primer conjunto de datos continuo a esta escala en la región. El ajuste preliminar obtenido para el sensor EC-5 (RMSE: 64,6% $\rightarrow$ 5,8%) constituye un primer paso hacia una calibración específica de sitio, aún pendiente de completar con un muestreo más representativo del rango de humedad. El trabajo futuro apunta a una solución robusta, escalable y orientada al manejo productivo del olivo en condiciones áridas y frías.

References

- Arias, N. S., Bucci, S. J., Scholz, F. G., & Goldstein, G. (2015). Freezing avoidance by supercooling in *Olea europaea* cultivars: The role of apoplastic water, solute content and cell wall rigidity. *Plant, Cell & Environment*, 38(10), 2061–2070. <https://doi.org/10.1111/pce.12529>
- Arias, N. S., Scholz, F. G., Goldstein, G., & Bucci, S. J. (2021). Low temperature acclimation and legacy effects of summer water deficits in olive freezing resistance. *Tree Physiology*, 41(9), 1548–1561. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab040>
- Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Umer, T., & Zikria, Y. B. (2019). Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review. *Electronics*, 9(2), 319. <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>
- Pivoto, D., Waquil, P. D., Talamini, E., Finocchio, C. P. S., Corte, V. F. D., & Mores, G. d. V. (2021). Scientific development of smart farming technologies and their application in brazil. *Information Processing in Agriculture*, 5(1), 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.002>
- Scholz, F. G., Bucci, S. J., Arias, N., & Goldstein, G. (2012). Osmotic and elastic adjustments in cold desert shrubs differing in rooting depth: Coping with drought and subzero temperatures. *Oecologia*, 170(4), 885–897. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2368-y>