

Bio-Hybrid Early Flood Warning System for the Argentine Mesopotamian Region: An Approach Based on the Fungus *Armillaria mellea*

Bianca Olim Levato 
bolimlevato@frro.utn.edu.ar

Joaquín E. Maza 
jomaza@frro.utn.edu.ar

Universidad Tecnológica Nacional,
Facultad Regional Rosario (UTN FRRO), Argentina.

Abstract. This paper proposes and analyzes the feasibility of a bio-hybrid early flood warning system tailored to the Argentine Littoral region, based on the integration of *Armillaria mellea* mycelium as a distributed biosensor and low-power LoRaWAN communication technology. In a national context characterized by a high recurrence of extreme hydrological events—which represent the most frequent and economically costly natural disaster in the country—and where a significant proportion of the population lives in vulnerable areas, a complementary solution to the traditional monitoring system is proposed, since which is currently limited by high infrastructure costs, uneven coverage, and operational latency.

The proposed architecture leverages the electrophysiological response of mycelium to variations in soil moisture, enabling the detection of flood precursor conditions through low-cost autonomous nodes equipped with local processing (edge computing) and long-range transmission. This approach enables hyperlocal, continuous, and energy-efficient detection, particularly relevant in rural or hard-to-access environments where deploying conventional telemetric stations is unfeasible.

The analysis results indicate a substantial improvement in the system's cost-benefit ratio and coverage density, while maintaining operational compatibility with existing infrastructures such as the Hydrological Information and Alert System (SIyAH). As a next step, the implementation of a pilot project in the Mesopotamian region is proposed, with the aim of validating the model under real-world conditions and laying the groundwork for future nationwide scalability, thus contributing to more resilient risk management adapted to Argentina's territorial characteristics.

Keywords: Argentina, *Armillaria mellea*, LoRaWAN, floods, bio-hybrid.

Sistema Bio-Híbrido de Alerta Temprana de Inundaciones para la Región Mesopotámica Argentina: Un Enfoque Basado en el Hongo *Armillaria mellea*

Resumen. El presente trabajo propone y analiza la viabilidad de un sistema bio-híbrido de alerta temprana de inundaciones para la región del litoral argentino, basado en la integración del micelio de *Armillaria mellea* como biosensor distribuido y tecnologías de comunicación LoRaWAN de bajo consumo. En un contexto nacional caracterizado por la alta recurrencia de eventos hidrológicos extremos —el desastre natural más frecuente y económicamente costoso del país—, y donde una proporción significativa de la población habita zonas vulnerables, se plantea una solución complementaria al sistema tradicional de monitoreo, actualmente limitado por altos costos de infraestructura, cobertura desigual y latencias operativas.

La arquitectura propuesta aprovecha la respuesta electrofisiológica del micelio ante variaciones en la humedad del suelo, permitiendo detectar condiciones precursoras de inundación mediante nodos autónomos de bajo costo, con procesamiento local (edge computing) y transmisión de largo alcance. Este enfoque habilita una detección hiperlocal, continua y energéticamente eficiente, particularmente relevante en entornos rurales o de difícil acceso donde las estaciones telemétricas convencionales resultan inviables.

Los resultados del análisis indican una mejora sustancial en la relación costo-beneficio y en la densidad de cobertura del sistema de alerta, manteniendo compatibilidad operativa con infraestructuras existentes como el Sistema de Información y Alerta Hidrológica (SIyAH). Como siguiente paso, se propone la implementación de un piloto en la región mesopotámica para validar el modelo en condiciones reales y sentar las bases de una futura escalabilidad a nivel nacional, contribuyendo a una gestión del riesgo más resiliente y adaptada a las particularidades territoriales de Argentina.

Palabras clave: Argentina, *Armillaria mellea*, LoRaWAN, inundaciones, bio-híbrido.

1. Introducción

Argentina es altamente vulnerable a las inundaciones, uno de los fenómenos naturales más recurrentes y costosos del país: representan el 54 % de los desastres naturales registrados desde 1970 y afectan a cerca del 28 % de la población, con pérdidas anuales promedio estimadas en USD 1.000 millones (Banco Mundial, 2025). Si bien su impacto es de alcance nacional, esta investigación se focaliza en el Litoral y la Mesopotamia argentina, particularmente en las provincias de Misiones, Corrientes, Entre Ríos y Santa Fe. Estas combinan alta recurrencia de crecidas con condiciones óptimas (suelos húmedos, vegetación abundante, clima templado a cálido) para el desarrollo natural de *Armillaria mellea*, el hongo propuesto como detector biológico. La recurrencia e intensidad de estos eventos demandan soluciones innovadoras que complementen los sistemas de alerta existentes.

2. Estado del Sistema Actual de Monitoreo y Alerta

El Sistema de Información y Alerta Hidrológica (SIyAH) de la Cuenca del Plata, creado en 1983 ante las crecidas de los ríos Paraná y Paraguay y operado bajo la órbita del Instituto Nacional del Agua (INA), constituye el principal mecanismo de vigilancia hidrológica del país. Se apoya en una red de más de 600 estaciones manuales y telemétricas que, bajo un régimen habitual de ocho horas diarias en días hábiles, escala a guardia permanente de 24 horas ante la superación de umbrales críticos. Sin embargo, presenta limitaciones estructurales relevantes: la distribución de estaciones es heterogénea, con menor densidad en zonas rurales y de difícil acceso, donde el alto costo de despliegue, energización y mantenimiento desalienta su expansión; la integración de datos de estaciones distantes genera demoras de entre 6 y 8 horas entre la medición y la emisión de alerta; y la operación de la red completa resulta costosa, con fallas de comunicación frecuentes asociadas a la distancia entre estaciones y centros de monitoreo (INA, 2026).

Es precisamente en estas zonas desatendidas donde el sistema bio-híbrido propuesto, basado en el micelio de *Armillaria mellea*, aporta su mayor valor: una capa de detección de mínima inversión económica que complementa, sin sustituir, la infraestructura existente.

3. Definición del Sistema Bio-Híbrido Propuesto

Frente a las limitaciones expuestas, se propone extender la capacidad de detección del SIyAH mediante nodos autónomos basados en biosensores de micelio, aportando una mayor cobertura en zonas rurales de difícil acceso.

El micelio, red subterránea de filamentos (hifas) que constituye el cuerpo vegetativo del hongo, opera como un sensor electroquímico natural: sus hifas generan y transmiten potenciales de acción a lo largo de la red (Adamatzky et al., 2022). Su actividad eléctrica se correlaciona con la disponibilidad de agua en el sustrato, según lo documentado por Phillips et al. (2023), quienes registraron trenes de picos eléctricos espontáneos ante variaciones específicas del contenido de humedad en compuestos de micelio; de modo que cambios en la saturación del suelo producen alteraciones medibles de conductividad, capturables por instrumentación electrónica convencional.

Para la región del Litoral argentino se seleccionó la especie *Armillaria mellea* por la combinación de tres rasgos biológicos. Sus rizomorfos, cordones de hifas melanizadas con un núcleo central especializado en la conducción de agua y nutrientes (Yafetto, 2018), actúan como cables naturales de baja atenuación con alcance de decenas de metros, permitiendo conectar múltiples electrodos sobre una misma red biológica troncal. Esta misma red sustenta un posible mecanismo de disparo por saturación: se hipotetiza que el anegamiento total del suelo, precursor inmediato de una crecida, induciría estrés por hipoxia y, en consecuencia, una caída abrupta de la tensión eléctrica del hongo. Esta hipótesis se sustenta en la biología conocida del estrés hipóxico fúngico, que documenta alteraciones metabólicas significativas ante la baja disponibilidad de oxígeno (Takaya, 2009), y en el vínculo establecido entre el estado metabólico del hongo y su actividad eléctrica (Phillips et al., 2023). No obstante, la medición directa del potencial eléctrico fúngico bajo condiciones de anegamiento o anoxia no ha sido reportada aún en la literatura, por lo que esta relación constituye un objetivo central de validación del proyecto. A esto se suma su ciclo de vida perenne y comportamiento saprófito, que garantizan que la red sensora opere durante décadas sin recambio de componentes.

La adquisición de la señal bioeléctrica, del orden de microvoltios a milivoltios, se estructura en cuatro etapas: captura diferencial mediante electrodos de referencia Ag/AgCl y electrodos de medición de acero inoxidable; acondicionamiento mediante un amplificador de instrumentación de alta impedancia (p. ej. INA128, CMRR 130 dB) y un filtro pasa-bajos con frecuencia de corte ajustable entre 10 y 30 Hz; digitalización mediante un ADC Delta-Sigma de 24 bits; y procesamiento por un microcontrolador que detecta la caída de tensión y transmite la trama vía un módulo LoRaWAN, todo ello alojado en un gabinete compacto de PVC con certificación IP68 instalado junto al sustrato fúngico.

Dada la cobertura cuasi continua del micelio en el sotobosque litoraleño, se estima una densidad operativa de 1 nodo por cada 0,5-2 km², incrementable en zonas de alta vulnerabilidad. La comunicación se apoya en LoRaWAN, tecnología LPWAN reconocida por su eficiencia energética en entornos rurales de baja conectividad (Raza et al., 2017): un único gateway puede cubrir un radio de hasta 20 km en campo abierto, permitiendo gestionar una constelación de nodos distribuidos en cientos de kilómetros cuadrados con mínima inversión de infraestructura. Este enfoque cuenta con un antecedente regional concreto: una red LoRaWAN ya desplegada en la Universidad Nacional de Misiones demostró cobertura efectiva mediante gateways de bajo costo en la ciudad de Posadas (Sosa & Sosa, 2023). El despliegue de nodos bio-híbridos sumaría una capa de monitoreo a microescala y alta eficiencia económica en zonas rurales.

4. Beneficios del Sistema y Desafíos de Implementación

El proyecto propuesto conlleva beneficios sustanciales frente a la infraestructura tradicional del SIyAH: minimiza costos de inversión y operación al emplear biosensores vivos junto a la red LoRaWAN, habilita un sensado temprano y de proximidad mediante el monitoreo directo del nivel de saturación del suelo, permitiendo evacuaciones más oportunas, y extiende la cobertura hacia territorios desatendidos, como la selva misionera o las zonas anegadizas del Delta del Paraná, donde las soluciones convencionales resultan inviables por costos, infraestructura o conectividad. Además, al tratarse de un organismo vivo, autorregenerable y biodegradable, el sistema aporta sostenibilidad ambiental, con nodos electrónicos de bajo consumo energético y operación autónoma.

No obstante, persisten desafíos técnicos significativos. La señal bioeléctrica no constituye una medición directa del nivel hidrométrico sino un indicador indirecto, por lo que su interpretación cuantitativa exige una extensa fase de validación de campo para cumplir con los estándares del SIyAH. Asimismo, la variabilidad ambiental, como la temperatura, las características del suelo y la interacción con otros organismos, introduce ruido que podría afectar la estabilidad de la señal.

5. Conclusión

El estudio realizado confirma que un sistema de alerta temprana basado en *Armillaria mellea* y redes LoRaWAN constituye una propuesta de alta viabilidad para las provincias de Misiones, Corrientes, Entre Ríos y Santa Fe, sustentada en la sensibilidad electrofisiológica del hongo ante la humedad y en el bajo costo de la tecnología LoRaWAN. Este sistema bio-híbrido no pretende sustituir la infraestructura del SIyAH, sino complementarla, añadiendo una capa de detección hiperlocal y de bajo costo en áreas rurales y remotas actualmente desatendidas. El siguiente paso es el desarrollo de un prototipo basado en la arquitectura propuesta, con el fin de obtener métricas acerca de su efectividad, que derivará posteriormente en la implementación de un proyecto piloto en una cuenca pequeña y controlada de la región mesopotámica, que permita calibrar la respuesta del biosensor, validar el modelo de comunicación en condiciones reales y generar evidencia para una futura escalabilidad regional. Como trabajo futuro, resulta necesario estudiar la preservación del micelio durante sequías prolongadas, que podrían inducir estados de latencia o fallas, y las atenuaciones de la señal en selvas densas o topografías irregulares, a fin de optimizar la topología de red y la disposición de gateways y repetidores.

Referencias

- Adamatzky, A., Ayres, P., Beasley, A., Chiolerio, A., Dehshibi, M. M., Gandia, A., Albergati, E., Mayne, R., Nikolaidou, A., Roberts, N., Tegelaar, M., Tsompanas, M., Phillips, N., & Wösten, H. (2022). Fungal electronics. *BioSystems*, 212, 104588. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2021.104588>
- Banco Mundial. (2025). *Gestión de riesgos de inundación en Argentina*. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2025/03/10/gesti-n-de-riesgos-de-inundaci-n-en-argentina>
- Instituto Nacional del Agua. (2026). *Sistemas de Información y Alerta Hidrológica*. <https://www.ina.gob.ar/siyah/index.php>
- Phillips, N., Gandia, A., & Adamatzky, A. (2023). Electrical response of fungi to changing moisture content. *Fungal Biology and Biotechnology*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40694-023-00155-0>
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855-873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
- Sosa, E. O., & Sosa, M. E. (2023). Empowering IoT development with LPWAN technology: A case study at the National University of Misiones. *Revista de Ciencia y Tecnología (RECyT)*, 40(1), 57-65. <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2023.40.007>
- Takaya, N. (2009). Response to hypoxia, reduction of electron acceptors, and subsequent survival by filamentous fungi. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 73(1), 1-8. <https://doi.org/10.1271/bbb.80487>
- Yafetto, L. (2018). The structure of mycelial cords and rhizomorphs of fungi: A mini-review. *Mycosphere*, 9(5), 984-998. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/9/5/3>