

INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y APRENDIZAJE FEDERADO PARA LA GESTIÓN INTELIGENTE DE HUERTOS URBANOS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND FEDERATED LEARNING FOR THE SMART MANAGEMENT OF URBAN GARDENS

Johanna MORENO-CASTELLANOS¹, Laura GRANDE-PÉREZ², Juan M. NÚÑEZ V.³
and Sara RODRÍGUEZ GONZÁLEZ⁴

¹ *Grupo de Investigación BISITE, Universidad de Salamanca. Salamanca, España*
✉ jmorenoc@usal.es
🌐 <https://orcid.org/0009-0008-3309-9891>

² *Grupo de Investigación BISITE, Universidad de Salamanca. Salamanca, España*
✉ lauragrande@usal.es
🌐 <https://orcid.org/0009-0004-2994-8628>

³ *Grupo de Investigación BISITE, Universidad de Salamanca. Salamanca, España*
✉ jmnunez@usal.es
🌐 <https://orcid.org/0000-0002-3165-6200>

⁴ *Grupo de Investigación BISITE, Universidad de Salamanca. Salamanca, España*
✉ srg@usal.es
🌐 <https://orcid.org/0000-0002-3081-5177>

RESUMEN: La seguridad y la soberanía alimentarias en contextos urbanos vulnerables enfrenta limitaciones asociadas a la escasez de recursos, la variabilidad climática y la falta de conectividad. Este trabajo propone una arquitectura inteligente basada en aprendizaje federado (*Federated Learning*) y *edge computing* para la gestión eficiente de huertos urbanos distribuidos. La solución integra sensores IoT que recopilan variables ambientales como temperatura, humedad y luminosidad, permitiendo que cada nodo entrene modelos locales para optimizar la productividad y el uso de recursos hídricos sin compartir datos crudos. Mediante un servidor federador, los modelos locales se agregan utilizando técnicas como FedAvg, generando un modelo global robusto y escalable. La incorporación de inteligencia artificial en el borde reduce la latencia, el consumo de red y mejora la resiliencia ante fallos de conectividad. Los resultados evidencian una mejora en la toma de decisiones, la optimización del riego y la identificación de patrones de consumo, contribuyendo al desarrollo sostenible de la agricultura urbana y a la protección de la privacidad de los datos

Palabras clave: aprendizaje federado; huertos urbanos; edge computing.

ABSTRACT: Food security and sovereignty in vulnerable urban contexts face limitations associated with resource scarcity, climate variability, and lack of connectivity. This work proposes an intelligent architecture based on federated learning and edge computing for the efficient management of distributed urban gardens. The solution integrates IoT sensors that collect environmental variables such as temperature, humidity, and light, allowing each node to train local models to optimize productivity and water resource use without sharing raw data. Through a federating server, local models are aggregated using techniques such as FedAvg, generating a robust and scalable global model. The incorporation of artificial intelligence at the edge reduces latency and network consumption and improves resilience to connectivity failures. The results show an improvement in decision-making, irrigation optimization, and the identification of consumption patterns, contributing to the sustainable development of urban agriculture and the protection of data privacy.

Keywords: federated learning; urban gardens; edge computing.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad y la soberanía alimentarias representan uno de los principales retos contemporáneos [1], especialmente en entornos urbanos con alta vulnerabilidad social y limitaciones de infraestructura. El crecimiento poblacional, el cambio climático y la presión sobre los recursos hídricos han impulsado el desarrollo de enfoques tecnológicos orientados a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción agrícola en pequeña escala. En este contexto, los huertos urbanos se consolidan como una estrategia clave para fortalecer la resiliencia alimentaria local [2], aunque su gestión continúa enfrentando desafíos relacionados con el monitoreo, la optimización de recursos y la toma de decisiones basada en datos.

El estado del arte evidencia una evolución progresiva desde la agricultura inteligente basada en IoT [3] hacia la incorporación de técnicas avanzadas de inteligencia artificial para la predicción y la optimización de variables agrícolas. Estudios recientes destacan el uso de *edge computing* como una solución para reducir la latencia [4], el consumo de ancho de banda y la dependencia de infraestructuras centralizadas, especialmente en escenarios con conectividad limitada. Asimismo, el aprendizaje federado ha emergido como un paradigma prometedor que permite entrenar modelos colaborativos sin necesidad de compartir datos sensibles, garantizando privacidad y escalabilidad [5]. A partir de estas tendencias, este trabajo propone una arquitectura que integra IoT, *edge computing* y aprendizaje federado para la gestión inteligente de huertos urbanos, orientada a optimizar el uso de recursos hídricos, mejorar la productividad y apoyar la seguridad alimentaria en comunidades vulnerables [6].

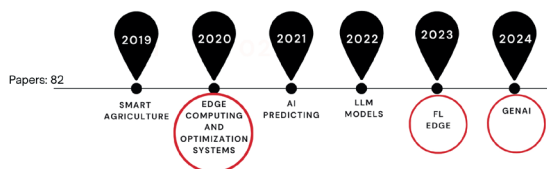


Figura 1. Línea del tiempo del estado del arte. Palabras claves seleccionadas para la investigación

La pregunta de investigación del proyecto es: ¿Cómo se puede contribuir a la seguridad y la soberanía alimentarias de las comunidades vulnerables y no interconectadas mediante la implementación de sistemas de aprendizaje federado agrícola para mejorar la productividad de los huertos urbanos?

2. METODOLOGÍA

La metodología de investigación se desarrolla bajo un enfoque experimental y aplicado, orientado al diseño, la implementación y la validación de una arquitectura inteligente basada en IoT, *edge computing* y aprendizaje federado para la gestión de huertos urbanos. En una primera fase, se realiza el análisis del contexto y el levantamiento de requerimientos, considerando condiciones ambientales, limitaciones de conectividad y necesidades de las comunidades vulnerables donde se implementan los huertos.

Posteriormente, se diseña e implementa la arquitectura IoT-Edge-FL, integrando sensores para la adquisición de variables ambientales como temperatura, humedad y luminosidad, así como nodos de procesamiento en el borde encargados del entrenamiento de modelos locales de aprendizaje automático. Cada nodo entrena su modelo de manera independiente, sin compartir datos crudos, preservando la privacidad de la información.

En la siguiente fase, se implementa el aprendizaje federado, donde los parámetros de los modelos locales son enviados a un servidor federador que consolida la información mediante algoritmos de agregación, como FedAvg, para generar un modelo global. Finalmente, el sistema es validado en huertos urbanos reales o simulados, evaluando métricas de productividad, eficiencia en el uso del agua, latencia y consumo de red, con el fin de analizar el impacto de la propuesta en la toma de decisiones y la sostenibilidad agrícola.



Figura 2. Metodología de investigación

3. RESULTADOS

Los resultados demuestran que la integración de aprendizaje federado y *edge computing* en huertos urbanos mejora la gestión inteligente del cultivo, al reducir la latencia y el consumo de ancho de banda mediante el procesamiento local de datos. Esta característica es especialmente útil en contextos con conectividad limitada. Los modelos locales, entrenados con variables ambientales, optimizan el uso del agua y ajustan el riego de forma más eficiente, mientras que el modelo federado global permite identificar patrones de consumo y productividad para apoyar la toma de decisiones. En conjunto, la solución propuesta contribuye a la sostenibilidad, la privacidad de los datos y la seguridad alimentaria en comunidades vulnerables.

La arquitectura propuesta sigue un enfoque Edge AIoT con aprendizaje federado y se organiza en tres capas: física, Edge y de aplicación. Los sensores IoT recolectan datos ambientales, los dispositivos Edge entrenan modelos locales con baja latencia y la capa de aplicación consolida los parámetros mediante un servidor federador (por ejemplo, FedAvg), generando un modelo global sin compartir datos sensibles. Esta arquitectura escalable y resiliente mejora la productividad agrícola y la optimización de recursos en entornos distribuidos.

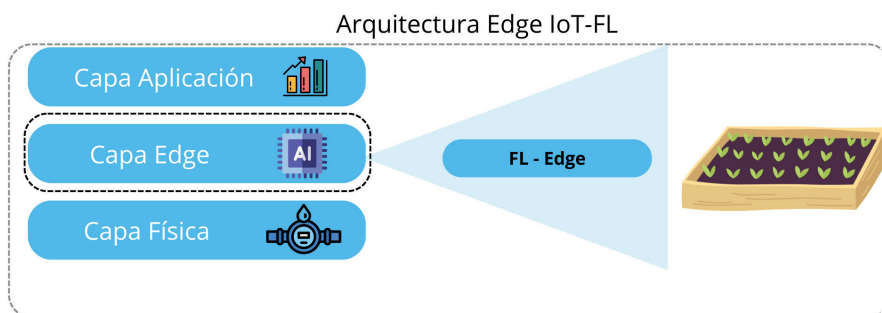


Figura 3. Arquitectura propuesta Edge-FL

4. CONCLUSIONES

La implementación de una arquitectura basada en IoT, *edge computing* y aprendizaje federado demuestra ser una solución efectiva para la gestión inteligente de huertos urbanos, especialmente en comunidades vulnerables y con conectividad limitada. El uso de aprendizaje federado permite entrenar modelos colaborativos sin compartir datos crudos, garantizando la privacidad de la información y promoviendo la soberanía de los datos agrícolas.

Los resultados evidencian que el procesamiento en el borde reduce la latencia y el consumo de red, mejorando la eficiencia operativa y la resiliencia del sistema frente a fallos de conectividad. Asimismo, la optimización del uso de los recursos hídricos y la identificación de patrones de consumo contribuyen a una mayor productividad y sostenibilidad de los cultivos.

Finalmente, esta propuesta tecnológica fortalece la seguridad y la soberanía alimentarias y sienta las bases para el desarrollo de políticas públicas y estrategias de apoyo a la agricultura urbana, integrando la inteligencia artificial como un habilitador clave para el desarrollo social y ambiental.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del Proyecto de Cátedra Internacional sobre Inteligencia Artificial Fiable y Reto Demográfico dentro de la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA), en el marco del Plan Europeo de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Referencia: TSI-100933-2023-0001. Este proyecto está financiado por la Secretaría de Estado para la Digitalización y la Inteligencia Artificial y por la Unión Europea (Next Generation).

6. REFERENCES

1. Grafton, R. Q., Daugbjerg, C., & Qureshi, M. E. (2015). Towards food security by 2050. *Food Security*, 7(2), 179-183. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0445-x>
2. Núñez V., J. M., Corchado, J. M., Giraldo, D. M., Rodríguez-González, S., & De la Prieta, F. (2024). Recommendation system using bio-inspired algorithms for urban orchards. *Internet of Things*, 26, Artículo 101173. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101173>
3. Quy, V. K., Hau, N. V., Anh, D. V., Quy, N. M., Ban, N. T., Lanza, S., Randazzo, G., & Muzirafuti, A. (2022). IoT-enabled smart agriculture: Architecture, applications, and challenges. *Applied Sciences*, 12(7), Artículo 3396. <https://doi.org/10.3390/app12073396>
4. El Jarroudi, M., Kouadio, L., Delfosse, P., Bock, C. H., Mahlein, A.-K., Fettweis, X., Mercatoris, B., Adams, F., Lenné, J. M., & Hamdioui, S. (2024). Leveraging edge artificial intelligence for sustainable agriculture. *Nature Sustainability*, 7(7), 846-854. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01352-4>

5. Dembani, R., Karvelas, I., Akbar, N. A., Rizou, S., Tegolo, D., & Fountas, S. (2025). Agricultural data privacy and federated learning: A review of challenges and opportunities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, Artículo 110048. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110048>
6. Núñez V., J. M., Corchado, J. M., & Giraldo, D. M. (2023). Development of an IoT network for urban orchards in high vulnerability areas in Colombia. In *Trends in Sustainable Smart Cities and Territories* (pp. 67-76). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36957-5_7