

Jornadas de Automática

Arquitectura de Información para la Unidad Experimental Agrivoltaica de Arkaute

Arantzazu Burgos^{a,*}, Joseba Sainz de Murieta^a, Amaia Ortiz^c, Aintzane Armentia^a, Álvaro Pedroza^a, Unai Villena^b.

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

^bDpto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

^cNEIKER-BRTA. Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. Campus Arkaute-Araba

To cite this article: Burgos, A., Sainz de Murieta J, Ortiz, A., Armentia, A., Pedroza, A., Villena, U. 2026. Arquitectura de Información para la Unidad Experimental Agrivoltaica de Arkaute Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13855>

Resumen

La reciente puesta en marcha de la Unidad Experimental de Agrivoltaica en Arkaute (UnExA) marca el inicio de la generación sistemática de datos en un entorno agrivoltaico. Este trabajo en curso presenta una propuesta de arquitectura de información orientada a la adquisición, tratamiento e integración de dichos datos, abordando la heterogeneidad de fuentes y modelos existentes. En una primera fase, se analizan los sistemas de información correspondientes a los dominios agroclimático, agronómico y energético para identificar sus características y necesidades específicas. Se ha diseñado también una base de datos que integra información procedente de los tres dominios. Paralelamente, se desarrollan prototipos de herramientas para la introducción, monitorización y procesamiento de los datos. Como línea de trabajo paralelo, los datos agroclimáticos se emplean para la validación de modelos de simulación de irradiación, con el objetivo de desarrollar una herramienta útil para el futuro diseño de instalaciones agrivoltaicas. Los resultados presentados corresponden a una fase inicial basada en los primeros datos disponibles.

Palabras clave: Agrivoltaica, arquitectura de información, integración de datos, monitorización, simulación de irradiación, agricultura digital

Information Architecture for the Arkaute Agrivoltaic Experimental Unit

Abstract

The recent commissioning of the Agrivoltaic Experimental Unit in Arkaute (UnExA) marks the beginning of systematic data generation within an agrivoltaic environment. This ongoing work presents a proposed information architecture for the acquisition, processing, and integration of these data, addressing the heterogeneity of existing data sources and models. In an initial phase, information systems from the agroclimatic, agronomic, and energy domains are analysed to identify their specific characteristics and requirements. A database integrating information from all three domains has also been designed. In parallel, prototype tools for data entry, monitoring, and processing are being developed. As a complementary line of research, agroclimatic data are being used to validate solar irradiation simulation models, with the aim of developing a decision-support tool for the future design and optimisation of agrivoltaic installations. The results presented correspond to an initial stage of the project and are based on the first datasets collected within the experimental unit.

Keywords: Agrivoltaics; Information Architecture; Data Integration; Data Monitoring; Irradiance Simulation; Digital Agriculture

1. Introducción

El 24 de abril de 2025 se inauguró en las instalaciones de Arkaute (Araba) del Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario (NEIKER), una Unidad Experimental de Agrivoltaica (UnExA) de cultivos herbáceos, con una

extensión aproximada de 8.000 m² (NEIKER, 2025). Esta instalación constituye un entorno real de experimentación para el estudio conjunto de la producción agrícola y la generación de energía fotovoltaica.

En el actual contexto de crisis sistémica, los sistemas agrivoltaicos representan una herramienta innovadora que

permite mejorar la productividad global del terreno, aumentar la resiliencia de los cultivos y generar nuevas oportunidades en el entorno rural (European Commission, 2022), (European Commission, 2019) (DIN SPEC 91434, 2021).

Según se define en (Proyecto AGRIPower, 2024): “La agrivoltaica hace referencia a la práctica de combinar eficientemente la producción agropecuaria como actividad principal, con la generación de energía solar fotovoltaica como actividad secundaria, en una misma superficie de tierra. Toda instalación agrivoltaica deberá estar diseñada, implementada y explotada de forma que se garantice que no interfiera negativamente de forma significativa ni con la producción y la calidad agrícola o ganadera ni con la salud del suelo y el ecosistema (biodiversidad) circundante, por lo que deberá disponer de sistemas de monitorización y normalización que permitan comprobar que estos aspectos no se vean comprometidos”.

Como se deriva de esta definición, la tecnología agrivoltaica responde a la necesidad de optimizar el uso del suelo y proteger el ecosistema en un contexto marcado por la transición energética, el cambio climático y el aumento de la demanda global de alimentos (European Commission, 2021) (International Energy Agency (IEA), 2023).

Hoy en día, la tecnología agrivoltaica se encuentra aún en una fase incipiente, basada principalmente en estudios experimentales y proyectos piloto (Jamil, U., Pearce J., 2026). La complejidad de estos sistemas, donde interactúan variables agronómicas, energéticas y ambientales, hace necesaria la generación de conocimiento basado en datos reales obtenidos en condiciones controladas y representativas.

La UnExA ha sido diseñada y construida como una infraestructura clave para este propósito, permitiendo realizar ensayos agronómicos condicionados por factores adicionales como la variabilidad espacial de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), los patrones dinámicos de sombreado y la interacción con las estructuras fotovoltaicas (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022).

Esta unidad experimental permitirá realizar análisis que van más allá de un solo cultivo, centrándose en la rotación de cultivos y la evolución de sus ciclos. Esto es crucial para evaluar la viabilidad agronómica de los sistemas agrivoltaicos, ya que uno de los objetivos es garantizar una producción continua durante todo el año con una sucesión de cultivos adecuada.

La UnExA ha comenzado a generar una gran cantidad de datos de diversas fuentes, lo que requiere el diseño de estrategias para su tratamiento, integración y análisis. Es esencial definir una arquitectura de información que organice estos datos de manera coherente para facilitar la monitorización, el análisis y la toma de decisiones.

Paralelamente, los datos agroclimáticos tratados adecuadamente, permitirán la validación de los modelos de simulación que se están desarrollando, contribuyendo al

desarrollo de herramientas para el diseño y apoyo para la toma de decisiones de instalaciones agrivoltaicas.

El presente trabajo propone una arquitectura de información orientada a la gestión de los primeros datos generados en la UnExA, así como su preparación, estructuración e integración, con el objetivo de permitir su análisis conjunto y la identificación de relaciones de influencia.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En primer lugar, se presenta la introducción, en la que se plantea el problema de la integración de la información en sistemas agrivoltaicos. A continuación, se describe la Unidad Experimental de Agrivoltaica (UnExA). Posteriormente, se expone la arquitectura de información propuesta, incluyendo la descripción de la estructura de la base de datos. Finalmente, se presentan los desarrollos realizados hasta la fecha y las principales conclusiones derivadas de ellos.

2. Descripción de la Unidad Experimental de Arkaute

La Unidad Experimental de Agrivoltaica (UnExA) de Arkaute (Figura 1) ha sido diseñada específicamente como una infraestructura de investigación capaz de responder a la necesidad de un entorno controlado que permita la realización de experimentos con distintos cultivos bajo diferentes condiciones de sombreado, facilitando así el estudio del comportamiento de los sistemas agrivoltaicos.



Figura 1: Fotografía de las primeras plantaciones en la Unidad Experimental de Agrivoltaica de Arkaute (NEIKER)

La zona experimental, de aproximadamente una hectárea, utiliza 212 paneles bifaciales (580 Wp) instalados a 4 metros de altura para facilitar el tránsito de maquinaria. El diseño emplea estructuras con distinta densidad de paneles (100% y 50%) y una zona de control sin sombras, lo que permite comparar científicamente cómo afectan los diferentes niveles de sombreado a la radiación incidente sobre los cultivos.

El sistema fotovoltaico consta de 18 series de módulos conectados a un inversor Sungrow de 100 kW. Incorpora tecnología Renesys para el control de vertido y utiliza la plataforma iSolarCloud para la monitorización continua de la producción eléctrica.

Como se muestra en la Figura 2, bajo los cuatro espigones se han dispuesto 10 líneas de cultivo de 90m de longitud dividida cada una de ellas en 28 celdas. Esta configuración permitirá contrastar los resultados agrícolas con las condiciones agroclimáticas de cada una de las celdas.

En cuanto al sistema agroclimático, la instalación dispone de cinco estaciones Cesen V2 GSM (ver Figura 2)

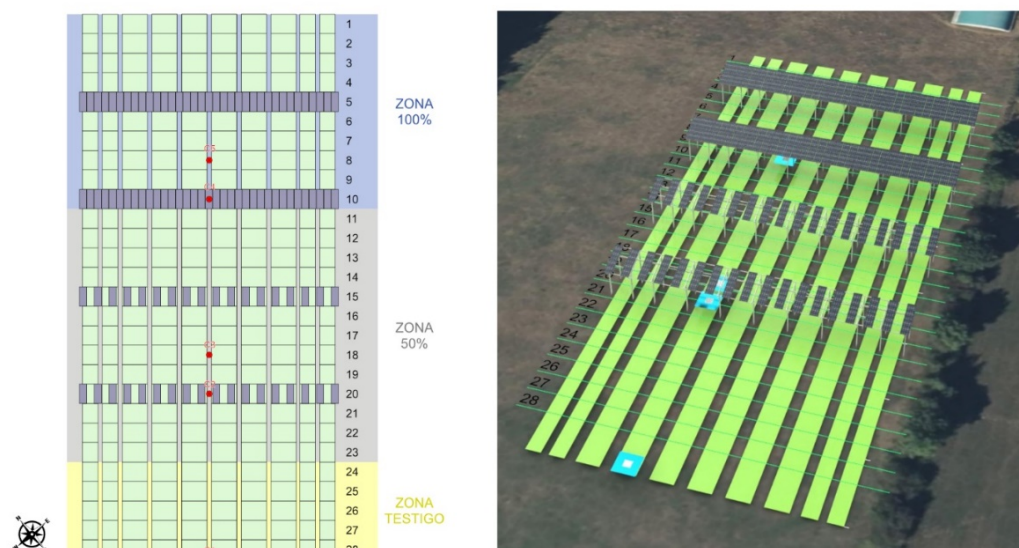


Figura 2: Disposición de las líneas de cultivo y modelo 3D

distribuidas para la captura integrada de variables meteorológicas y agronómicas, incluyendo temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar y ultravioleta, velocidad y dirección del viento, y precipitación. Asimismo, incorporan sensores específicos para el seguimiento de cultivos, como sensores de radiación fotosintéticamente activa (PAR), humectación foliar y sondas de humedad del suelo a diferentes profundidades. La conectividad GSM permite la transmisión continua de datos, posibilitando su análisis en tiempo real y su utilización en la toma de decisiones experimentales.

Los sistemas de la UnExA atienden dominios específicos (agroclima, agricultura y energía) y, su heterogeneidad técnica exige estrategias de integración que permitan la explotación conjunta de datos preservando la especialización de cada área

3. Arquitectura de Información

La arquitectura propuesta (Fig. 3) integra fuentes de datos mediante una capa de preprocesado y normalización para su almacenamiento centralizado. Esta información es la base que sustenta la simulación, monitorización y el análisis integrado del sistema agrivoltaico.

En la parte izquierda del esquema se sitúan los sistemas de información que actúan como fuentes de datos, distinguiéndose tres dominios principales:

- El sistema de información agroclimática, basado en las cinco estaciones Cesens, cuyos datos son gestionados en

la plataforma cloud Cesens y accesibles mediante servicios tipo API REST o exportación a ficheros.

- El sistema de información de producción agraria, que recoge datos asociados a cultivos, operaciones agrícolas y observaciones experimentales, principalmente en formatos estructurados como archivos CVS o registros manuales.

- El sistema de información de producción de energía, que integra datos procedentes del inversor a través de la plataforma iSolarCloud, igualmente exportables en formatos estructurados.

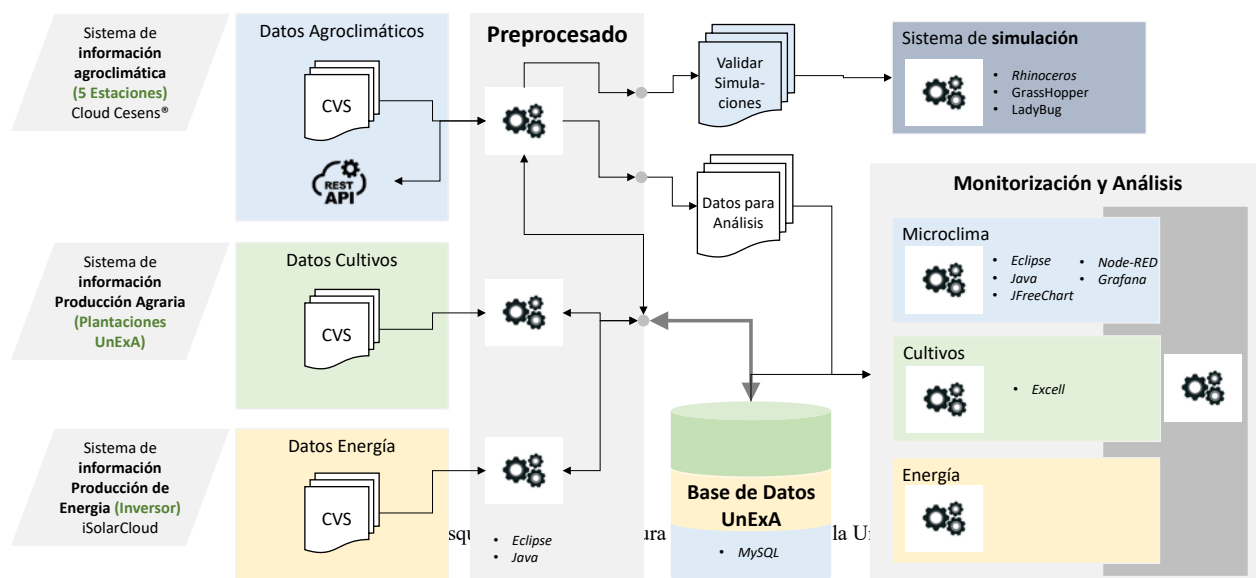
Los distintos sistemas generan datos que, en su estado inicial, presentan una elevada heterogeneidad tanto a nivel estructural y semántico como en los formatos de almacenamiento, frecuencias de actualización y mecanismos de acceso. Esta fragmentación dificulta su interoperabilidad y limita la posibilidad de realizar análisis conjuntos que permitan evaluar de forma integrada el comportamiento del sistema agrivoltaico.

Con el objetivo de abordar esta problemática, se define una capa intermedia de **preprocesado de datos**, cuya función principal es la adquisición, depuración, transformación y alineamiento semántico de la información procedente de las distintas fuentes.

Esta capa permite convertir los datos heterogéneos en conjuntos estructurados y coherentes, adecuados tanto para su análisis exploratorio como para su utilización en procesos de validación de modelos de simulación. Desde el punto de vista arquitectónico, esta fase constituye el elemento clave para la transición desde sistemas aislados hacia una gestión integrada de la información. La integración coordinada de los dominios agroclimático, agronómico y energético requiere mecanismos que faciliten la interoperabilidad entre componentes y aplicaciones heterogéneas, alineándose con enfoques recientes basados en la colaboración entre componentes funcionales encapsulados dentro de arquitecturas distribuidas

y escalables (Sierra, R., Sarachaga, I., Burgos, A., Álvarez Gutiérrez, M. L., 2024).

Los datos resultantes de este proceso de preprocesado se almacenan en una **base de datos** relacional centralizada, que actúa como repositorio común y núcleo de integración del sistema. La base de datos (BD) constituye el punto de conexión entre las etapas de procesamiento y las aplicaciones de uso final.



A partir de esta base, se habilitan dos líneas principales de explotación de la información: Por un lado, un sistema de simulación apoyado en herramientas como Rhinoceros, Grasshopper y Ladybug (Roudsari, M. S., Mackey, C., 2021), orientado al análisis del comportamiento microclimático bajo diferentes configuraciones del sistema agrivoltaico. Por otro lado, un entorno de monitorización y análisis que permite el seguimiento y la explotación de los datos en cada dominio.

4. Desarrollos y Validaciones

En este apartado se presentan los principales desarrollos realizados y en curso, así como las primeras validaciones llevadas a cabo en las distintas capas del sistema. Tal y como se ha indicado anteriormente, se trata de un trabajo en desarrollo, en el que tanto la arquitectura como los componentes funcionales están siendo implementados y evaluados progresivamente.

4.1 Adquisición y análisis de datos Agroclimáticos

En el ámbito de los datos agroclimáticos, se han desarrollado distintas soluciones orientadas tanto a la adquisición como la monitorización de información microclimática.

En primer lugar, se ha implementado un prototipo de monitorización IoT para una estación agroclimática con características análogas a las instaladas en la UnExA. Este prototipo se basa en una arquitectura tecnológica compuesta por Node-RED para la adquisición y preprocesado de los datos, MySQL como sistema gestor de bases de datos y Grafana para la monitorización. Dicha solución permite la

adquisición, almacenamiento y monitorización en tiempo real de los datos generados. La estación utilizada corresponde al modelo CWT-UWD-SDTHNPMIAPR del fabricante ComWinTop, que opera mediante el protocolo Modbus RTU sobre interfaz RS485. El dispositivo integra sensores para la medición de variables relevantes como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, nivel de ruido, concentración de partículas en

suspensión (PM10 y PM2.5), iluminación, precipitación y radiación solar. La integración en la red se realiza mediante un convertidor RS485 a Ethernet (Waveshare RS485 to ETH), lo que facilita la interoperabilidad del sistema.



Figura 4: Monitorización IoT de la estación meteorológica

En segundo lugar, se ha abordado el tratamiento de los ficheros generados por la plataforma Cesen mediante el desarrollo de una clase en lenguaje Java, utilizando el entorno de desarrollo Eclipse, que implementa métodos específicos para la lectura, transformación y adaptación de los datos. Este componente constituye la base del proceso de preprocesado, en el que se llevan a cabo tareas de limpieza, normalización y estructuración de la información. Dichas funcionalidades permiten adecuar los datos a los requisitos de distintas herramientas, así como garantizar su coherencia antes de su almacenamiento en la base de datos. Como resultado, se obtienen conjuntos de datos homogéneos y preparados para su análisis conjunto. Complementariamente, se ha desarrollado un prototipo de monitorización de las estaciones Cesen basado en WindowBuilder y la biblioteca JFreeChart, que permite la

representación gráfica de los datos procesados, mostrados en la Figura 5.

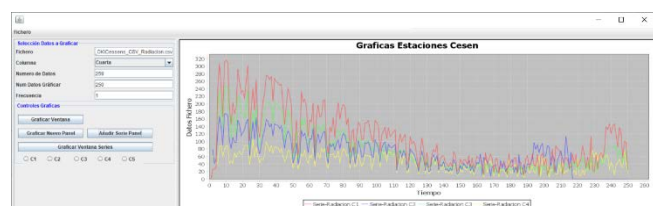


Figura 5: Monitorización datos estaciones Cesen

Asimismo, se está avanzando en la asociación de los datos agroclimáticos a las celdas de cultivo, línea de trabajo actualmente en desarrollo.

Estos desarrollos han permitido establecer una base sólida para la integración de datos agroclimáticos en el sistema

4.2 Desarrollo de la base de datos

La base de datos está diseñada para gestionar y analizar datos procedentes la UnExA. En la Figura 6 se muestra el Modelo Entidad Relación Extendido de la base de datos diseñada. Su estructura se basa en una organización jerárquica del espacio experimental, comenzando por la entidad UnExA_NEIKER, que representa el conjunto del ensayo, y que se divide en franjas que segmentan físicamente el terreno, también denominadas líneas de cultivo tal y como se puede observar en la Figura 2. Sobre estas franjas se definen las plantaciones, donde se registran los cultivos plantados, así como información asociada a fechas de plantación y cosecha y al personal responsable. Cada franja se subdivide en *celdas*, que constituyen la unidad básica de observación y muestreo. Estas celdas recogen información detallada relativa a su localización, así como variables experimentales clave como la influencia de los paneles fotovoltaicos, lo que permite evaluar el impacto de diferentes niveles de sombreado sobre el desarrollo de los cultivos. Además, a las celdas se les asocian las estaciones meteorológicas más próximas, permitiendo así integrar datos ambientales y del suelo en el análisis.

El modelo incorpora, asimismo, entidades orientadas a la gestión de los *cultivos* y del *personal*. La información asociada a los cultivos permite caracterizar las especies objeto de estudio e integrar aspectos relacionados con sus requerimientos a lo largo de su ciclo fenológico. Por su parte, la inclusión del personal responsable, tanto de las labores de plantación como de la obtención de observaciones experimentales, aporta un mecanismo explícito de trazabilidad, contribuyendo a garantizar la consistencia, fiabilidad y calidad de los datos registrados.

El núcleo funcional de la base de datos reside en la modelización de las *mediciones*, que almacenan información temporal asociada a cada celda, incluyendo variables como el estado fenológico (escala BBCH), la incidencia de enfermedades y otras variables específicas. Estas mediciones se encuentran vinculadas tanto a la celda como al personal responsable de su registro.

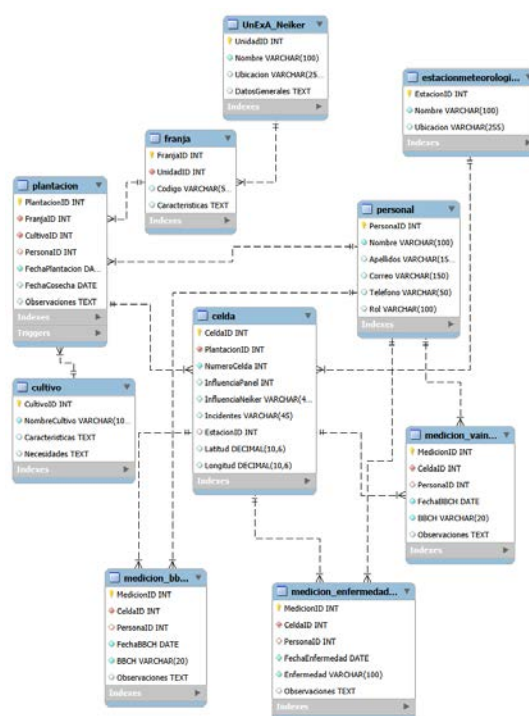


Figura 6: Modelo EER de la BD de la UnExA

La definición de las variables específicas ha constituido un aspecto crítico en el diseño del modelo, dado que la naturaleza de las mediciones varía en función del cultivo. En este sentido, se ha observado que cada variedad de cultivo requiere la captura de parámetros particulares: por ejemplo, en el caso de la alubia se registran datos del número de vainas correspondientes a cinco plantas por celda, en cultivos como cebolla o rábano se miden los calibres, mientras que en lechuga o espinaca se recogen variables relacionadas con el peso de las plantas en seco y mojado, entre otras.

Esta heterogeneidad pone de manifiesto la necesidad de un modelo de datos flexible y extensible, capaz de adaptarse a distintos esquemas de observación sin comprometer la integridad estructural del sistema. Actualmente, se encuentra en desarrollo la incorporación de nuevas entidades y estructuras de almacenamiento orientadas a representar de manera explícita estas particularidades, posibilitando así una gestión más precisa y normalizada de la información experimental. Este enfoque resulta coherente con las tendencias actuales de digitalización industrial basadas en modelos de información interoperables para la representación de activos físicos y la integración de datos procedentes de múltiples sistemas, facilitando la construcción de arquitecturas escalables y reutilizables (Hurtado, E., Burgos, A., Armentia, A., Casquero, O., 2025)

La dimensión temporal actúa como eje integrador del modelo, permitiendo el seguimiento fenológico y la realización de análisis comparativos. Al vincular el espacio, las variables agronómicas y las condiciones ambientales, proporciona una base sólida para la interpretación de los resultados.

Actualmente, la base de datos se encuentra implementada

en MySQL que es sistema gestor de la BD, habiéndose llevado a cabo las primeras pruebas de inserción y gestión de datos manualmente y mediante una aplicación desarrollada en Java, utilizando el entorno de desarrollo Eclipse. Esta aplicación permite el acceso a la base de datos y constituye el primer paso hacia la validación funcional del diseño e implementación del sistema.

4.3 Preparación de datos para simulación

La validación de los modelos de simulación empleados en la UnExA requiere una etapa previa de preparación y depuración de los datos procedentes de las estaciones meteorológicas Cesen.

Para realizar el modelo de simulación se han desarrollado una serie de motores de cálculo que simulan la irradiación incidente sobre el terreno a partir de un fichero epw (Energy Plus Weather Data) que contiene los datos meteorológicos de un año típico.

Antes de comparar las mediciones reales de irradiación proporcionadas por las estaciones Cesens con las simulaciones de irradiación obtenidas, resulta imprescindible garantizar la consistencia y calidad de las series temporales utilizadas.

Este proceso, realizado en el preprocesado, incluye la detección y tratamiento de registros erróneos o anómalos, la interpolación controlada de huecos de medida ocasionados por incidencias de adquisición o comunicación y la homogeneización de la resolución temporal de los datos. En particular, dado que las estaciones proporcionan registros cuartohorarios mientras que las simulaciones se generan con resolución horaria, es necesario realizar procesos de agregación temporal que permitan comparar ambas fuentes de información bajo condiciones equivalentes.

La concordancia entre datos reales y simulados se evalúa mediante indicadores estadísticos (R y R^2), los cuales validan la robustez del modelo frente a variables meteorológicas y de diseño. Esta validación experimental es clave para convertir las simulaciones en herramientas de apoyo a la toma de decisiones, permitiendo optimizar configuraciones técnicas y estrategias agrícolas al reducir la incertidumbre en la estimación de radiación solar.

5. Conclusiones

La UnExA constituye una oportunidad única para la generación de conocimiento empírico sobre sistemas agrivoltaicos y la arquitectura de información propuesta en este trabajo se presenta como una solución robusta para abordar los retos identificados.

La implementación de una capa de preprocesado y una base de datos centralizada permitirá gestionar eficazmente datos con naturalezas, estructuras y frecuencias de adquisición muy diversas (agroclimáticos, de producción energética y agronómicos) preservando así la especificidad de cada dominio de conocimiento.

El uso de datos agroclimáticos reales permitirá también la

validación de los motores de cálculo de irradiación con el objetivo de reducir la incertidumbre técnica y convertir estas simulaciones en herramientas fiables de apoyo a la toma de decisiones durante las fases de diseño y planificación de este tipo de sistemas.

El diseño jerárquico y flexible de la base de datos, estructurado en celdas de cultivo y vinculado a la dimensión temporal y al personal responsable, garantizará la trazabilidad y calidad de la información experimental. Esta estructura permite además adaptarse a diferentes tipos de cultivos y configuraciones de sombreado.

Como trabajo en curso, se prevé la integración total de los flujos de datos en tiempo real y la expansión del modelo de datos para recoger las particularidades fenológicas de una mayor variedad de cultivos. Asimismo, la arquitectura aquí presentada servirá de base para optimizar estrategias de explotación agrícola y configuraciones constructivas que maximicen la eficiencia del uso del suelo.

En definitiva, la arquitectura desarrollada no solo organiza el flujo de datos de la UnExA, sino que constituye la base necesaria para transformar los datos brutos en conocimiento útil para el impulso de la tecnología agrivoltaica.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por FEDER bajo el proyecto Interreg POCTEFA 2021-2027 EFA030/01 AgriPower y el proyecto ELKARTEK KK-2025/00035

Referencias

- DIN SPEC 91434, 2021. Agrivoltaics – Requirements for agricultural primary use,” German Institute for Standardization.
- European Commission, 2019. The European Green Deal.
- European Commission, 2021. Regulation (EU) 2021/1119 establishing the European Climate Law.
- European Commission, 2022. EU Solar Energy Strategy.
- Hurtado, E., Burgos, A., Armentia, A., Casquero, O., 2025. Self-configurable Manufacturing Industrial Agents (SMIA): a standardized approach for digitizing manufacturing assets. *Journal of Industrial Information Integration*, Volume 47. DOI 10.1016/j.jii.2025.100915
- International Energy Agency (IEA), 2023. World Energy Outlook.
- Jamil, U., Pearce J., 2026. Agrivoltaics as a systems innovation: Multi-dimensional benefits from global studies across climate, agriculture, energy, and ecosystems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 230. DOI 10.1016/j.rser.2026.116721
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022. InSPIRE: Innovative Solar Practices Integrated with Rural Economies and Ecosystems.
- NEIKER, 2025. Inauguramos en Arkaute la unidad agrovoltaica experimental más grande del Estado de cultivos herbáceos para investigar su viabilidad. Noticias NEIKER, 24 Apr. 2025. Available at: <https://neiker.eus/es/noticias/inauguramos-en-arkaute-la-unidad-agrovoltaica-experimental-mas-grande-del-estado-de-cultivos-herbaceos-para-investigar-su-viabilidad/>.
- Proyecto AGRIPower, 2024. Análisis del estado del arte de Sistemas Agrivoltaicos. Proyecto Agripower. Informe técnico DOI:10.5281/zenodo.18683560
- Roudsari, M. S., Mackey, C., 2021. Ladybug Tools: A free and open-source environmental plugin suite for Grasshopper. Available at: <https://www.ladybug.tools>
- Sierra, R., Sarachaga, I., Burgos, A., Iriondo, N., Álvarez, M. L., 2024. Colaboración entre agentes industriales de componentes de control encapsulados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial (RIAI)*, Volume 22(1). DOI 10.4995/riai.2024.21953