

**ESTUDIO DE SISTEMAS INTELIGENTES PARA
OPTIMIZAR EL USO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA
ACTIVIDAD AGROINDUSTRIAL EN EL TERRITORIO DE
LA UNAJ**

*Study of intelligent systems to optimize the use of solar radiation in the
agroindustrial activity in the territory of UNAJ*

- ❖ *Marcelo A. Cappelletti, mcappelletti@unaj.edu.ar*
- ❖ *Lucas M. Olivera, lolivera@unaj.edu.ar*
- ❖ *Leonardo J. Amet, ljamet@unaj.edu.ar*
- ❖ *Jorge R. Osio, josio@unaj.edu.ar*
- ❖ *Jésica V. Guzmán, jvguzman06@gmail.com*
- ❖ *Matías G. Suárez, msuarez@unaj.edu.ar*
- ❖ *Julissa Atía, jatia@unaj.edu.ar*
- ❖ *Patricio M. Gross, pgross@unaj.edu.ar*
- ❖ *Martín Morales, martin.morales@unaj.edu.ar*

Universidad Nacional Arturo Jauretche

Resumen

La Universidad Nacional Arturo Jauretche (UNAJ) se localiza en Florencio Varela, uno de los partidos con mayor superficie rural dentro del conurbano bonaerense. Cuenta con más de 500 pequeñas y medianas empresas productoras que se dedican a la horticultura

cuyas actividades están basadas fundamentalmente en los cultivos intensivos, tanto a campo abierto como en invernadero. En general, estas empresas presentan inconvenientes tales como poca innovación tecnológica, falta de registros históricos de magnitudes de interés, mano de obra poco calificada, no promoción del uso racional y eficiente de la energía, y la no utilización de energías alternativas. En este proyecto, la investigación se enfocó sobre el uso de herramientas tecnológicas basadas en internet de las cosas, inteligencia artificial y recursos renovables, que permitan brindar soluciones innovadoras y de bajo costo a las principales problemáticas mencionadas previamente. Así:

- a) Se diseñó e implementó un sistema inteligente de monitoreo, control y gestión, completamente autónomo, que contribuya a mejorar el desarrollo de cultivos intensivos y promover el uso racional y eficiente de la energía y la utilización de energías alternativas.
- b) Se analizaron diferentes modelos de redes neuronales artificiales (RNA) para la estimación de la radiación solar global en la región de la UNAJ, lo cual será de suma utilidad para la optimización de sistemas que aprovechen la energía solar como recurso energético.
- c) Se optimizaron dispositivos fotovoltaicos basados en diferentes materiales y tecnologías de fabricación, por medio de herramientas computacionales. El proyecto ha contribuido muy satisfactoriamente a la formación de recursos humanos..

Palabras claves: sistemas inteligentes, radiación solar, cultivos intensivos

Abstract

The National University Arturo Jauretche (UNAJ) is located in Florencio Varela, one of the districts with the largest rural area within the Greater Buenos Aires. It has more than 500 small and medium horticultural producers, whose activities are mainly based on intensive farming, both in the open field and in the greenhouse. In general, these producers have problems such as: little technological innovation; lack of historical records of magnitudes of interest; low skilled labor; do not promote the rational and efficient use of energy; do not use alternative energies. In this project, the research was focused on the use of technological tools based on the Internet of Things, artificial intelligence and renewable resources, which allow to provide innovative, advanced and low-cost solutions to the main problems previously identified. For this:

- a) A completely autonomous intelligent system for monitoring, control and

management, was designed and implemented, to help improve the development of intensive crops and promote the rational and efficient use of energy and the use of alternative energy.

- b) Different artificial neural network models were analyzed to estimate global solar radiation in the UNAJ region, which will be extremely useful for optimizing systems that take advantage of solar energy as an energy resource.
- c) Photovoltaic devices based on different materials and manufacturing technologies were optimized by means of computational tools. The project has contributed very satisfactorily to the training of human resources.

Keywords: Intelligent systems, Solar radiation, Intensive farming

Introducción

Estado actual del conocimiento sobre el tema. Marco teórico

La Universidad Nacional Arturo Jauretche (UNAJ) se localiza en el partido de Florencio Varela, uno de los municipios con mayor superficie rural dentro del conurbano bonaerense. Florencio Varela cuenta aproximadamente con unas 500 pequeñas y medianas empresas productoras hortícolas, florícolas y frutícolas. Estas actividades están basadas fundamentalmente en los cultivos intensivos, donde se busca maximizar la producción en espacios reducidos, utilizando solo uno o dos tipos de productos por vez, tanto a campo abierto como bajo cubierta (invernaderos). En particular, la producción de cultivos intensivos bajo cubierta es una de las estrategias para extender la estacionalidad natural, asegurar abastecimiento continuo de los mercados y permitir el desarrollo de producciones en regiones con limitaciones climáticas.

Una de las particularidades sobresalientes de esta zona rural es que limita con áreas de similares características, con los partidos vecinos, lo que transforma a la subregión en estratégica para la producción de alimentos frescos de origen vegetal, tanto para el consumo directo como para la industrialización. Por ejemplo, el área frutihortícola y florícola provee de verduras y hortalizas frescas (acelga, espinaca, lechuga y perejil), frutos y flores a quienes habitan en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y en los partidos que componen el Gran Buenos Aires, y además se exporta su producción hacia otras provincias.

Sin embargo, este sector agroindustrial presenta en general una serie de inconvenientes tales como:

- cuenta con poca innovación tecnológica para aumentar sus niveles de producción, mejorar la calidad de los productos, prevenir plagas, etc.;

- no tiene registros históricos de variables de interés, tales como magnitudes climatológicas ni del estado del suelo, agua o nivel de iluminación;
- la mano de obra no posee una adecuada calificación;
- no promueve el uso racional y eficiente de la energía ni utiliza energías alternativas.

Todas estas limitaciones dificultan alcanzar el aprovechamiento óptimo de los recursos, lo cual se traduce en uso inadecuado, pérdidas de la producción, problemas de rentabilidad por bajos rendimientos e inapropiada calidad de los productos. Por lo tanto, existen fuertes demandas de tecnología adecuada que permitan aumentar la producción por unidad de superficie y disminuir los costos correspondientes.

Con el propósito de remediar estos inconvenientes, en este proyecto, la investigación se enfocó sobre tres líneas de estudio diferentes, detalladas a continuación:

- a) Diseño, desarrollo e implementación de un sistema inteligente de monitoreo, control y gestión para optimizar la producción de cultivos intensivos, tanto a campo abierto como bajo cubierta (invernadero), automatizando determinados procesos y minimizando el consumo de energía.
- b) Estimación de la radiación solar global en la zona de influencia de la UNAJ, a partir de variables meteorológicas de sencilla adquisición, mediante RNA, lo cual será de suma utilidad para la optimización de sistemas que aprovechen la energía solar como recurso energético.
- c) Diseño y optimización de dispositivos fotovoltaicos basados en diferentes materiales y tecnologías de fabricación, por medio de herramientas computacionales.

Estas líneas de investigación se encuentran en el marco del Programa TICAPPS (Tecnologías de la Información y la Comunicación [TIC] en aplicaciones de interés social) de la UNAJ, aprobado mediante Resolución N° 064/17. El Programa TICAPPS, de la carrera Ingeniería en Informática de la UNAJ, tiene como objetivo general fortalecer la actividad de investigación y vinculación en el área de las TIC que contribuyan a remediar las problemáticas existentes dentro del territorio de la UNAJ en las áreas de medio ambiente, salud, medio productivo y educación. Particularmente, una de las cuatro áreas que conforman el Programa TICAPPS está relacionada con el estudio y desarrollo de herramientas tecnológicas (*hardware-software*) basadas en el internet de las cosas (en inglés, *Internet of Things* [IoT]) e inteligencia artificial, para una innovación tecnológica de avanzada, y que puedan contribuir en aplicaciones agronómicas, ambientales y biomédicas.

A continuación, se presenta un breve marco teórico sobre los aspectos principales de

cada una de las líneas de estudio desarrolladas en el proyecto.

Sistemas inteligentes

El extraordinario avance que vienen teniendo en los últimos años las herramientas de las TIC ha permitido emplear diferentes estrategias, como el uso de sistemas inteligentes en áreas tales como ingeniería, análisis de suelos, análisis climático, ecología, análisis genético, economía, medicina, entre otras. Los sistemas inteligentes están compuestos por un conjunto de elementos, herramientas y aplicaciones informáticas, las cuales llevan a cabo la extracción, la recopilación y el procesamiento de la información obtenida desde diferentes fuentes con el fin de tomar decisiones autónomas y adecuadas para diversos usos.

En general, los sistemas inteligentes utilizan técnicas de aprendizaje automático (en inglés, *machine learning*) junto con herramientas de IoT. El aprendizaje automático es un subcampo de la inteligencia artificial en el que se usan diferentes algoritmos capaces de aprender de su entorno: a partir de un conjunto de datos de ejemplos particulares o experiencias pasadas que el algoritmo recibe en la etapa de entrenamiento y sin necesidad de una intervención humana explícita (Jordan y Mitchell, 2015; Harrington, 2012). El aprendizaje de las computadoras se refiere a la capacidad para identificar patrones en grandes conjuntos de datos y a través de ellos tomar decisiones, o hacer una predicción acerca de comportamientos futuros de los sistemas en estudio. Las técnicas de aprendizaje automático pueden ser utilizadas para modelar, identificar, optimizar, predecir y controlar el comportamiento dinámico de diferentes sistemas reales.

Las características principales de los algoritmos de aprendizaje automático son ser capaces de resolver problemas no lineales, aprender de ejemplos, encontrar correlaciones entre datos diversos, manejar diferentes tipos de datos (numéricos, textuales, imágenes, etc.), tratar con grandes conjuntos de datos o conjuntos de datos de alta dimensión, ser tolerantes a fallos (es decir, sobrellevar el ruido y datos incompletos o atípicos), realizar predicciones y generalizaciones a altas velocidades; y procesar en tiempo real. Si bien las primeras teorías sobre el aprendizaje automático se desarrollaron en la década del 80, existen dos razones principales por las que solo han empezado a resultar útiles recientemente: requieren de grandes cantidades de datos y de una potencia de cálculo significativa.

Una de las técnicas más utilizadas del aprendizaje automático son las RNA, las cuales están inspiradas en el funcionamiento del sistema nervioso de los seres vivos. Consisten en una arquitectura conformada por un conjunto de neuronas artificiales, las cuales se conectan entre sí intercambiando información o estímulos al mismo tiempo que están organizadas en capas.

El notable desarrollo que han tenido en los últimos años estas técnicas, sumado al aumento en la capacidad de cómputo mediante el uso de diferentes tecnologías como la

denominada “computación en la nube” (en inglés, *cloud computing*) o el uso de la unidad de procesamiento gráfico (GPU) para el análisis de información, ha permitido obtener importantes avances en áreas tales como: medicina, seguridad, turismo, finanzas, robótica, entre otras. Algunos ejemplos de dichos avances son el control de vehículos autónomos, la detección de rostros, detección de matrículas, diagnóstico de enfermedades, realidad aumentada, entre otros.

Por su parte, el concepto de IoT ha adquirido gran relevancia en los últimos años, debido a la posibilidad que ofrece de interconectar diversos objetos físicos entre sí y la conectividad a internet que provee a tales redes de objetos, independientemente de la intervención humana. En general, los sistemas basados en IoT están conformados por unidades de procesamiento para el control del sistema, memorias, módulos inalámbricos de bajo consumo para comunicaciones locales, sensores, actuadores, y una plataforma web integrada, encargada de recibir la información de todos los sensores, procesarla, aplicar la lógica necesaria y desencadenar una respuesta.

La integración de técnicas de aprendizaje automático con las herramientas de IoT, conocida como “industria 4.0”, posibilita la interconectividad, la automatización, el aprendizaje automatizado y los datos en tiempo real, lo cual a su vez permite aportar inteligencia a los procesos, obtener sistemas más eficientes, ofrecer mejores productos y servicios y, en consecuencia, conseguir un mayor retorno de la inversión.

Radiación solar

El incremento continuo de la demanda energética a nivel mundial y la respectiva disminución de reservas de combustibles fósiles y el impacto ambiental asociado a su combustión ha empujado el desarrollo hacia recursos energéticos alternativos. En este sentido, el estudio de fuentes de energía renovables es una temática de interés global y local. Ante el contexto planteado, surgen iniciativas tecnológicas para explorar y abordar esta problemática. Al respecto, la energía solar constituye una fuente limpia y renovable con bajo impacto ambiental, disponibilidad en el sitio de consumo y sostenibilidad. Esta energía se presenta entonces como uno de los recursos más importantes tendiente a sustituir las fuentes de energía no renovables (carbón, petróleo, gas natural), reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y proteger nuestro medio ambiente.

El conocimiento preciso de la radiación solar en un determinado instante y lugar es un factor clave para la planificación agrícola, dado que la distribución de radiación solar determina el rendimiento y desarrollo de los cultivos, y la baja disponibilidad o el exceso de ella puede producir daños irreparables. A su vez, la radiación solar es un recurso fundamental en el diseño arquitectónico y en el dimensionamiento óptimo de sistemas con diferentes principios de operación, como los sistemas fotovoltaicos (SFV) para la generación de

electricidad y los colectores solares para el calentamiento de fluidos. En el caso específico de los SFV, la cantidad total de radiación solar que llega tiene un rol determinante en la evaluación de la producción potencial de energía eléctrica que podría producirse en ese lugar.

El problema es que no siempre es posible contar con datos experimentales de la radiación solar en los lugares de interés (Raichijk Grossi Gallegos y Righini, 2005). Además, la radiación solar disponible en un punto determinado de la superficie terrestre es fuertemente dependiente de la localización geográfica (latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar) y de los microclimas locales del sitio (temperatura, humedad, entre otras variables meteorológicas), con lo cual se trata de una magnitud variable con el tiempo de manera instantánea, horaria, diaria y estacional.

La radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal puede ser medida por piranómetros, los cuales son dispositivos costosos que requieren ser calibrados a intervalos regulares y con un apropiado mantenimiento para asegurar la calidad de los datos (Pandey y Katiyar, 2013). Previamente, han sido reportados en la literatura diferentes técnicas para modelar la radiación solar, entre ellas se encuentra la ecuación de Ångström- Prescott y sus modificaciones, así como también modelos lineales, polinómicos, exponenciales y logarítmicos (Assi, Jama y Al-Shamisi, 2012), las técnicas geoestadísticas (Leal, Tiba y Piacentini, 2009), las técnicas estocásticas (Kaplanis y Kaplani, 2010) y las técnicas basadas en imágenes satelitales (Polo Martínez, 2010). Sin embargo, todos los modelos mencionados pueden sufrir problemas de precisión debido a la incertidumbre de las condiciones iniciales, como consecuencia de la cobertura de nubes y su efecto en la atenuación de la radiación solar en una localización específica. Por esta razón, este campo de estudio se encuentra abierto a nuevas propuestas que presenten alto rendimiento en la precisión de los resultados, con un bajo costo de cómputo, facilidad de implementación y buena velocidad de convergencia. Al respecto, gracias al crecimiento de las capacidades de cálculo y al mejoramiento de los algoritmos implementados, en los últimos años se han comenzado a utilizar técnicas basadas en RNA como una buena alternativa para la estimación de la radiación solar con el mínimo error (Pang, Niu y O'Neill, 2020; Çoban y Onar, 2020; Neelamegam y Amirtham, 2016; Khatib y Elmenreich, 2015).

Dispositivos fotovoltaicos

Los dispositivos fotovoltaicos (también denominados “celdas solares”) convierten la energía solar en electricidad a un bajo costo operativo, con disponibilidad en el sitio de consumo, sostenibilidad y bajo impacto ambiental (Taretto, 2015). Estos dispositivos constituyen entonces una alternativa sumamente viable tendiente a sustituir las fuentes de energía no renovables (carbón, petróleo, gas natural), reducir las emisiones de dióxido de

carbono a la atmósfera y proteger nuestro medio ambiente. Sin embargo, uno de los principales problemas que presentan hoy en día las celdas solares es que, de toda la energía solar disponible, solamente es aprovechada una pequeña fracción para la conversión en energía eléctrica, por lo que es necesario profundizar la investigación para optimizar su eficiencia. En este sentido, en los últimos años, existe un fuerte incentivo para el estudio de celdas solares basadas en diferentes materiales y tecnologías de fabricación.

Las celdas solares constituyen los componentes principales de los SFV, los cuales son cada vez más utilizados en aplicaciones terrestres (domésticas e industriales) y espaciales. Los SFV se clasifican en:

- a) Sistemas autónomos (conocidos como “sistemas aislados” u *off-the-grid*): independientes de la red eléctrica, suelen ser utilizados en lugares donde esta no existe, por lo que en general requieren de baterías para almacenar la energía recolectada.
- b) Sistemas conectados a la red (SFVCR) (conocidos como “sistemas *on-grid*”): la energía recolectada es inyectada a la red eléctrica.
- c) Sistemas híbridos: SFVCR con baterías de respaldo. También puede referirse a sistemas en los que coexisten diversas fuentes de energía, como por ejemplo: SFV, aerogeneradores, baterías de respaldo, etc.

En particular, los SFVCR se han convertido en los últimos años en una alternativa sumamente viable en el esquema de la generación distribuida, es decir, en la generación de energía eléctrica a partir de diversas fuentes de energías renovables, tales como solar (mayoritariamente energía fotovoltaica), eólica, o una combinación de estas, en lugares lo más próximos posibles a su utilización. Así se proporciona un ahorro tanto en el transporte de energía como en el costo de la tarifa eléctrica. El área de influencia de la UNAJ es un territorio propicio para la instalación de SFV autónomos y de SFVCR, en sectores rurales, industriales y residenciales.

Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del proyecto es el de generar conocimiento y herramientas tecnológicas basadas en IoT, la inteligencia artificial y los recursos renovables (energía solar) para brindar soluciones innovadoras y de bajo costo a las principales problemáticas existentes en la actividad agroindustrial de la zona de influencia de la UNAJ.

Conjuntamente con el objetivo general mencionado, el proyecto propicia la formación de recursos humanos, tanto de docentes investigadoras e investigadores como de estudiantes, que se dedican a entrenarse al máximo nivel en las diferentes líneas de investigación incluidas en el proyecto.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto son:

- a) Diseñar, desarrollar e implementar un sistema inteligente de monitoreo, control y gestión, completamente autónomo, que contribuya a mejorar el desarrollo de cultivos intensivos y a promover el uso racional y eficiente de la energía y la utilización de energías alternativas.
- b) Estudiar y proponer diferentes modelos de RNA para la estimación de la radiación solar global en la zona de influencia de la UNAJ, a partir de variables meteorológicas de sencilla adquisición, lo cual será de suma utilidad para la optimización de sistemas que aprovechen la energía solar como recurso energético.
- c) Diseñar y optimizar dispositivos fotovoltaicos basados en diferentes materiales y tecnologías de fabricación, por medio de herramientas computacionales.

Hipótesis

En función de los objetivos específicos mencionados previamente, las hipótesis de trabajo son:

- Es factible implementar sistemas inteligentes, alimentados mediante recursos renovables (tales como la energía solar), que permitan contribuir a mejorar la producción de cultivos intensivos en huertas de la región y, al mismo tiempo, reducir el consumo de energía.
- La utilización de técnicas basadas en RNA posibilitará estimar la radiación solar en un determinado instante y lugar, lo cual resulta esencial para lograr su aprovechamiento óptimo, en pos de mejorar tanto el desarrollo de los cultivos como la eficiencia de los SFV.
- El análisis teórico de celdas solares mediante modelado y simulación identificará posibles mejoras para implementar tanto en el diseño como en la fabricación de una versión perfeccionada de estos dispositivos con características específicas que optimicen la relación costo-beneficio.

Metodología

A continuación, se describen los aspectos principales del diseño metodológico llevado a cabo para cada una de las tres líneas de estudio desarrolladas en el proyecto.

Diseño, desarrollo e implementación de un sistema inteligente aplicado a cultivos intensivos

Planificación del sistema inteligente

Como primera medida, se planificó un sistema inteligente completamente autónomo que, por un lado, obtenga información precisa en tiempo real de magnitudes climatológicas, del estado del suelo, agua y nivel de iluminación, y, por el otro, que este sistema, con base en la información recabada, pueda tomar decisiones de manera automática a través de un control inteligente, para propiciar el desarrollo de los cultivos intensivos, así como un uso racional y eficiente de la energía. El sistema fue diseñado para aumentar o disminuir el nivel de iluminación que reciben los cultivos en invernadero, el riego por goteo o bien emitir mensajes de alertas a los usuarios, cada vez que algún valor salga o entre de un umbral predeterminado.

Diseño individual de los bloques

El sistema completo se dividió en bloques funcionales que fueron diseñados y desarrollados independientemente hasta el momento de la implementación del prototipo funcional. A su vez, se definieron las interfaces de comunicación entre dichos bloques y se comenzó con la prueba de lectura de los sensores. Además, en esta etapa se implementó un servidor web, una base de datos para el almacenamiento y la presentación de datos históricos en línea, y una aplicación móvil, la cual permite mostrar mensajes de alarmas y parámetros en los dispositivos de los productores.

Desarrollo del prototipo final

En esta etapa se interconectaron los bloques individuales y se adaptaron las interfaces de cada uno de los bloques de la etapa anterior. Asimismo, se realizó la programación del algoritmo de control que procesa los datos y genera las alarmas.

Prueba del prototipo final

Esta prueba consistió en un testeo intensivo del funcionamiento del sistema, emulando la lectura de los sensores con los diferentes rangos de valores y verificando la obtención de las salidas esperadas.

Prueba en campo

Para esta etapa se pretende instalar y poner en actividad el sistema desarrollado en una huerta de la región, para comprobar su funcionamiento teniendo en cuenta los factores reales, lo cual permitirá determinar en qué medida el sistema desarrollado ofrece mejores resultados que las técnicas convencionales; y comprobar si el entorno desarrollado es amigable para las usuarias y los usuarios finales.

Estimación de la radiación solar global

La metodología de trabajo adoptada para esta línea de estudio es la generalmente utilizada en el análisis mediante RNA.

Búsqueda bibliográfica

La primera tarea consistió en investigar y analizar conceptos de inteligencia artificial, particularmente de RNA, con el propósito de adquirir conocimientos y capacidades específicas sobre los últimos avances referidos a estas temáticas (fundamentos, evolución, características, aplicaciones, estructura, eficiencias, etc.).

Obtención de los datos

Es la fase de búsqueda de los datos necesarios para realizar el estudio correspondiente, los cuales pueden provenir de diferentes fuentes: sensores, páginas web, base de datos públicos, etc. En este caso, se utilizaron datos históricos de magnitudes meteorológicas, tales como temperatura mínima, media y máxima, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica y radiación solar global. Los datos corresponden a tres estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Buenos Aires, más precisamente en las localidades de Florencio Varela (situada en el predio de la UNAJ),¹ Hurlingham y Llavallol. En el caso de estas últimas dos localidades, los datos fueron obtenidos de la plataforma en línea Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (SIGA-INTA).² Si bien la red SIGA está conformada por más de 500 estaciones meteorológicas distribuidas por nuestro país, muy pocas de ellas cuentan con datos de radiación solar, apenas dos estaciones en la provincia de Buenos Aires, las cuales son las utilizadas en este trabajo. Esto pone en evidencia la importancia de esta línea de estudio.

Los datos recolectados de estas tres estaciones meteorológicas se encuentran en planillas de cálculos (formato csv), las cuales contienen datos históricos, desde la puesta en funcionamiento de cada una de ellas, lo que implica tener una cantidad de datos dispares. Por ejemplo, la estación de Hurlingham ofrece datos diarios desde el año 2009; sin embargo, recién a partir del año 2017 presenta datos de radiación solar global diaria. Por otro lado, la estación de Llavallol ingresó al sistema en el mes de diciembre de 2018, por lo que solo se dispone de datos diarios desde esa fecha hasta el presente. Finalmente, la estación de la UNAJ se puso en funcionamiento en el mes de diciembre de 2017.

Tratamiento y preprocesado de datos

Una vez completa la fase anterior, se procedió a procesar los datos recolectados con

¹ Ver <https://www.unaj.edu.ar/estacion-meteorologica-para-el-desarrollo-territorial/>

² Ver <http://siga2.inta.gov.ar>

el objetivo de obtener el mayor rendimiento posible. Se trata de un proceso de limpieza de los datos en bruto, para lo cual se suelen realizar diferentes tareas, como por ejemplo: la reducción de la dimensión, la normalización, la detección de valores atípicos, un análisis estadístico y gráfico de los datos, análisis de datos faltantes, entre otras operaciones. La recopilación de datos y su preprocesado constituyen quizás las fases más importantes del análisis.

Al finalizar esta etapa se cuenta con un conjunto de datos limpio que contiene información significativa y relevante, para que pueda ser procesado por modelos de RNA con la mayor precisión posible. En este caso, se analizaron los datos disponibles, y como parte de la tarea de limpieza de los datos, se descartaron los valores medidos entre las 21.00 y las 6.00, donde la radiación solar es nula. Además, se conformaron dos conjuntos de datos (en inglés, dataset) diferentes: el diario, que considera únicamente un valor por día, y el horario, que contiene valores tomados cada 30 minutos entre las 6.00 y las 21.00. El *dataset* horario solo contiene datos de la estación meteorológica de la UNAJ, dado que las de Hurlingham y Llavallol no ofrecen esta información, sino que presentan un resumen de valores diarios. Finalmente, para cada conjunto de datos se realizó un análisis estadístico con el objetivo de determinar la correlación entre la radiación solar global con las restantes magnitudes meteorológicas consideradas.

División de datos para entrenamiento y testeo

El total de datos de cada conjunto de datos se dividió, a su vez, en dos conjuntos distintos, uno para entrenar y otro para evaluar los modelos propuestos, en pos de asegurar su buen funcionamiento y eficiencia.

Estudio y comparación de diferentes RNA

Esta etapa consistió en seleccionar el modelo de RNA adecuado para el tipo de datos que se posee, en este caso modelo supervisado de regresión, dado que los modelos son entrenados a partir de un conjunto de datos en el que la respuesta correcta es conocida (modelo supervisado) y el resultado es un valor numérico, dentro de un conjunto infinito de posibles resultados (modelo de regresión). A su vez, dado que no existe una técnica ni una arquitectura óptima para todos los problemas, se analizaron diferentes RNA, de manera de comparar sus prestaciones y seleccionar la más adecuada de acuerdo con los requisitos previstos.

Entrenamiento de los modelos

En esta fase se suministraron los datos procesados a los modelos de RNA estudiados, que difieren entre sí, en el número de capas ocultas, el número de neuronas en cada capa oculta, el tipo de función de activación utilizada en cada capa, el algoritmo y la tasa de

aprendizaje, entre otros parámetros. La finalidad del entrenamiento es la de conseguir que los modelos puedan hacer predicciones a partir de las características disponibles. Para ello, los modelos entrenados tienen que generalizar, a partir de datos particulares, a las situaciones no vistas previamente. Como se mencionó anteriormente, los modelos de RNA bajo análisis son modelos de regresión, los cuales buscan determinar la relación entre una variable dependiente (radiación solar global en este caso), con respecto a una u otras variables, llamadas “explicativas” o “independientes” (temperatura, humedad relativa, etc.).

Evaluación de los modelos

Esta es la etapa de prueba y análisis del desempeño de los modelos entrenados en la fase previa. Los desempeños de cada uno de los modelos formulados fueron evaluados y comparados sobre la base de parámetros estadísticos, los cuales permiten elegir el mejor modelo con el mínimo error posible. Las métricas que normalmente se utilizan para evaluar modelos de regresión son: el coeficiente de determinación (R^2), el error absoluto medio (en inglés, *Mean Absolute Error* [MAE]), la raíz cuadrática del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error* [RMSE]) y el coeficiente de variación del RMSE (CV[RMSE]).

En las Ecuaciones 1-4 se puede ver cómo estos valores son calculados, donde las variables y , \hat{y} , \bar{y} y n , que aparecen en las ecuaciones, representan los datos de entrenamiento, los datos estimados, el promedio de los datos de entrenamiento y el tamaño de los datos de entrenamiento, respectivamente. El coeficiente R^2 determina el porcentaje de variabilidad de los datos que es explicada por el modelo. El parámetro MAE es definido como una cantidad utilizada para medir cuán próximos se encuentran los valores calculados respecto de los valores medidos. Por su parte, el RMSE indica el nivel de dispersión que produce el modelo bajo análisis.

Análisis e interpretación de los resultados

En esta fase se representa el conocimiento obtenido. Para ello se buscó la manera más limpia e intuitiva de visualizar los resultados a través de gráficos y tablas, con el objetivo de facilitar su interpretación efectiva.

Diseño y optimización de dispositivos fotovoltaicos

Finalmente, respecto a esta línea de estudio, la metodología de trabajo se apoyó en el uso de diferentes herramientas computacionales para el estudio de celdas solares basadas en diferentes materiales y tecnologías de fabricación.

Por un lado, se emplearon programas de simulación de dispositivos fotovoltaicos, los cuales posibilitaron el análisis por medio de ecuaciones para representar su

comportamiento, y ofrecieron un conocimiento detallado y preciso para predecir y mejorar su respuesta bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Particularmente, se utilizaron los códigos SCAPS-1D y PC-1D, ambos de libre acceso y ampliamente avalados por la comunidad científica relacionada con las celdas solares (Lin *et ál.*, 2020; Haider *et ál.*, 2019; Casas *et ál.*, 2017). Estos programas resuelven numéricamente las ecuaciones básicas de los semiconductores: Poisson y continuidad de portadores, de manera de poder obtener la respuesta del dispositivo bajo diferentes condiciones de diseño y de funcionamiento. Para la validación de los modelos, se compararon los resultados obtenidos con resultados experimentales en aquellos casos que estaban disponibles.

Los parámetros de entrada más relevantes a dichos códigos son aquellos que caracterizan las propiedades de transporte de los portadores minoritarios de los materiales y las estructuras analizadas, como por ejemplo, longitud de difusión (o tiempo de vida medio), velocidad de recombinación superficial, densidades de dopado, movilidades, espesores de capas, entre otras. Un análisis eficiente de los dispositivos fotovoltaicos a través de modelos teóricos depende fuertemente del conocimiento preciso de estos parámetros. Sin embargo, existen severas limitaciones para ello, debido a la complejidad de determinarlos de manera experimental y a que el acceso a esta información suele estar restringido por parte de los fabricantes de los dispositivos por razones de confidencialidad.

Esta limitación puede subsanarse a partir de la utilización de lo que se denomina “ingeniería inversa” (*reverse engineering*), es decir, el proceso mediante el cual es posible obtener la mayor cantidad de información técnica sobre un producto (dispositivo, herramienta o sistema) que permita analizar su diseño, fabricación y funcionamiento en detalle, con el objetivo de comprender, modificar y mejorar dicho producto. La ingeniería inversa tiene muchas aplicaciones en el mundo actual y es aplicada por las más variadas empresas tecnológicas.

Específicamente, en este estudio, se propuso un método basado en algoritmos genéticos para la extracción de parámetros de celdas solares, tales como resistencia serie, corrientes inversas de saturación y las propiedades de transporte de los portadores minoritarios (longitud de difusión y velocidad de recombinación superficial), mediante el ajuste de modelos teóricos con curvas experimentales de salida de los dispositivos, como las curvas de corriente-tensión (I-V) y la curva de eficiencia cuántica externa (EQE).

Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto, para cada una de las líneas de estudio desarrolladas.

Diseño, desarrollo e implementación de un sistema inteligente aplicado a cultivos intensivos

Prototipo experimental del sistema

A través de la metodología explicada en la sección anterior, se diseñó y desarrolló un prototipo experimental de un sistema de seguimiento y control de parámetros, escalable y completamente autónomo, para ser implementado en invernaderos ubicados en el territorio de la UNAJ. El objetivo de este prototipo es que contribuya a mejorar el desarrollo de cultivos intensivos, en línea con atender las necesidades tecnológicas de un sector del medio socioproductivo que carece de dicho soporte.

Este prototipo desarrollado, de acceso remoto, basado en un conjunto de sensores y actuadores manejados por una unidad de procesamiento, reacciona según la lectura de sus sensores de humedad del suelo, temperatura y luminosidad, accionando actuadores para el riego artificial, encendido de la iluminación artificial, o alarmas en tiempo real, según corresponda. En principio, se consideraron estos parámetros dado que son los que requieren mayor cuidado. Además, el sistema contempla la posibilidad de que la persona acceda al estado actual e histórico de las variables de interés por medio de un servidor web.

Para la unidad de procesamiento se utilizaron dos opciones diferentes, por un lado, una placa LPCXpresso 1769 con el microcontrolador ARM Cortex-M3 de NXP y, por otro lado, una Raspberry Pi 3. La gran ventaja de la Raspberry Pi es su potencialidad para la implementación del servidor, la configuración de entradas y salidas y el soporte para el lenguaje Python. Además, al permitir trabajar con herramientas de alto nivel, facilita el desarrollo y extensión del sistema. Hoy en día, los ordenadores de placas reducidas se han convertido en una herramienta muy poderosa para la integración y el control de muchos sistemas industriales o sistemas embebidos.

Tanto el acceso a los sensores como la actualización del servidor web y el sistema de control, han sido desarrollados mediante tres hilos separados, lo cual le otorga autonomía al sistema. En cuanto al sistema de control, se utilizaron un sensor de temperatura Max6576; un sensor de humedad del suelo DTH11; un sensor de iluminación ISL29003; actuadores para luz artificial, riego y rociadores; y alarmas de incendio y de sequía.

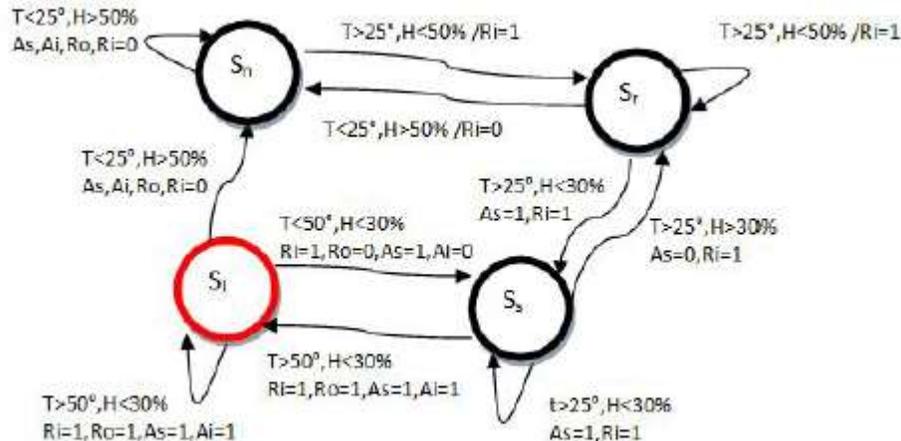
El sistema de control debe realizar mediciones periódicas de los sensores relevantes del sistema. Con base en esto, debe tomar decisiones sobre los actuadores y las alarmas (por ejemplo: cuando el sensor de iluminación mide un valor por debajo de un umbral mínimo, deberían activarse las luces artificiales).

La Figura 1 muestra el diagrama de estados que representa el sistema de control que tiene como variables de entrada a la temperatura y humedad del suelo, y como variables de salida, a rociadores, riego, alarma de sequía y alarma de incendio. En cada estado se realiza

la tarea de activar o desactivar los actuadores o las alarmas necesarias según las entradas.

Figura 1.

Diagrama de estados del sistema para los parámetros de temperatura y humedad del suelo

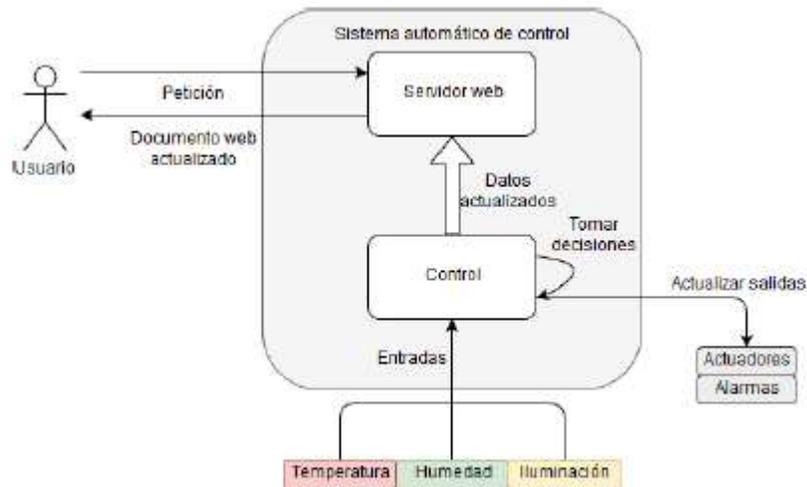


El sistema se alimenta mediante baterías. Se pretende, a futuro, incorporar un sistema fotovoltaico, para recargar la batería durante el día, para lograr, de esta manera, una autonomía prácticamente infinita.

Adicionalmente, en paralelo al sistema de control, el servidor web debe responder las peticiones de las personas para visualizar todos los parámetros medidos en tiempo real (estado actual del sistema). En la Figura 2, se observa un diagrama en bloques del sistema completo, en donde se visualiza la interconexión entre los sensores/actuadores y el sistema de control/servidor web (implementado en la Raspberry Pi). Asimismo, se muestra la interacción entre la persona y el sistema, mediante la página web, la cual guarda un registro histórico de los valores, y puede generar reportes, en forma de gráficos y tablas, del comportamiento de todos los datos medidos y su comportamiento en el tiempo. El acceso a la página web se realiza mediante la interfaz Ethernet.

Figura 2.

Diagrama en bloques del sistema completo en donde se muestra la interfaz de usuario, interacción con sensores y actuadores



En la Figura 3 se muestra la pantalla principal del sistema donde se visualiza el estado en tiempo real de los sensores, los actuadores, las alarmas y las acciones. Aquí se puede observar un ejemplo en el cual el valor de la iluminación está por debajo del umbral establecido y se visualiza en color rojo. En este estado, el sistema de control deberá actuar sobre el relé para el encendido de la iluminación artificial, es por eso que en la parte de los actuadores, se visualiza el estado de la luz led en *on* (encendida). A su vez, en la parte inferior de la figura se detallan los estados de las acciones que toma el sistema y en este caso se visualiza el estado de la luz artificial en “Activado” y el del resto de los actuadores “Desactivado”.

Las pruebas de funcionamiento realizadas se pueden considerar satisfactorias, debido a que fueron generadas, mediante el calentamiento del sensor de temperatura y la variación del vapor de agua en el sensor de humedad, condiciones para que el sistema pase por los distintos estados y se puedan verificar las acciones sobre los actuadores. De la misma manera se sometió al sensor de iluminación a la luz natural y artificial para verificar su correcto funcionamiento.

Por lo tanto, se puede concluir que se desarrolló un sistema eficiente que cumple con los requerimientos planteados. El siguiente paso consiste en realizar las pruebas en campo y obtener resultados concretos que permitan realizar un seguimiento a lo largo del tiempo, para lo cual se cuenta con la Asociación de Productores Hortícolas de Florencio Varela y Berazategui (APHOVABE) como institución adoptante en capacidad de aplicar los resultados desarrollados en el marco del proyecto. Esta etapa quedó pendiente como consecuencia de la particular situación vivida en el marco de la pandemia de la COVID-19.

Los resultados más importantes obtenidos durante el diseño y desarrollo del sistema fueron presentados en reuniones científicas con referato (Cabral *et ál.*, 2019; Hromek *et ál.*, 2019, Osio *et ál.*, 2019; Osio *et ál.*, 2020).

Figura 3.

Pantalla principal del sistema de control



Red de sensores

Debido a que la propuesta apunta a hacer un sistema escalable, se desarrolló una red de microcontroladores Arduino interconectados entre sí, los cuales poseen sensores de diferentes características (según la conveniencia de la ubicación del microcontrolador) que obtienen información de la ubicación en la cual se encuentran. Cada uno de estos microcontroladores Arduino, que funcionan como nodos, se distribuyen en diferentes partes y envían la información a un nodo central (Arduino Mega), el cual se encarga de procesar la información recibida por los demás y almacenarla en una base de datos en la nube. El nodo

central también se encarga de verificar que los parámetros regulares se mantengan de acuerdo a lo especificado para el área correspondiente, en caso contrario, es quien dispara la alerta para la persona a través de la interfaz GSM/GPRS. La Figura 4 y la Figura 5 muestran el esquema implementado para la red de sensores y las funciones principales del nodo central, respectivamente:

Figura 4.

Arquitectura implementada para el sistema de microcontroladores



El sistema desarrollado, que se explicó en la sección anterior, es portable y de bajo consumo, ideal para este tipo de aplicaciones, pero la interfaz Ethernet no siempre está disponible en las zonas donde se desarrolla este tipo de actividad. Por esto, para que la propuesta sea aplicable en cualquier lugar, se planteó la utilización de una interfaz GSM/GPRS que permita transmitir información mediante las antenas celulares, directamente a un servidor o a los dispositivos celulares cargados en el sistema.

Figura 5.

Nodo central (envío de alertas y almacenamiento de información)



Para el almacenamiento de la información generada en la red de sensores desarrollada, se ha creado una interfaz de programación de aplicaciones servidor (API Servidor) con Node JS, que registra la información del nodo central y la almacena en una base de datos NoSQL (MongoDB). En una primera instancia se buscó almacenamiento en la nube como AWS, Azure, entre otros, pero dado que estas plataformas son pagas y por encontrarse el proyecto aún en etapa de pruebas, solo se hicieron pruebas locales. Así, por el momento, la API no fue alojada en ningún servicio en la nube.

Finalmente se creó un sistema web para consultar la información generada por la red de sensores y que se encuentra almacenada en la base de datos mencionada. Este sistema se desarrolló con tecnologías actuales como: React JS integrado con AntDesign, Node JS y MongoDB. Fue publicado en la plataforma gratuita Heroku y su base de datos, en Mongo Atlas. De esta manera, el sistema web se encuentra completamente en la nube, con una base de datos de pruebas que posee información estática.

Estimación de la radiación solar global

Esta línea de estudio presenta el desarrollo y la evaluación del desempeño de diferentes modelos de RNA para la estimación de la radiación solar global diaria y horaria, en la zona de influencia de la UNAJ, a partir del conocimiento de variables meteorológicas tales como temperatura, humedad relativa, entre otras. Las RNA están inspiradas en el sistema nervioso de los seres vivos y permiten crear modelos de predicción, ya que poseen la capacidad de generalizar y de aprender de patrones de entrada produciendo valores de salida ante la recepción de estímulos similares.

El análisis fue llevado a cabo a través de un programa propio desarrollado en el lenguaje de programación Python. Al tratarse de un código propio, se posee un control pleno sobre cada una de sus partes, así como también la libertad de modificarlo e implementar nuevas funcionalidades de acuerdo con los estudios que se deseen realizar.

A partir de la metodología mencionada en la sección anterior, se llevaron a cabo dos análisis diferentes para cada uno de los conjuntos de datos considerados (*dataset* diario y *dataset* horario). A continuación, se presentan las consideraciones más relevantes de ambos análisis desarrollados:

Estimación de la radiación solar global diaria

Para este análisis fue utilizado el *dataset* diario, considerando únicamente valores diarios (un valor por día) correspondientes al período comprendido entre enero y noviembre

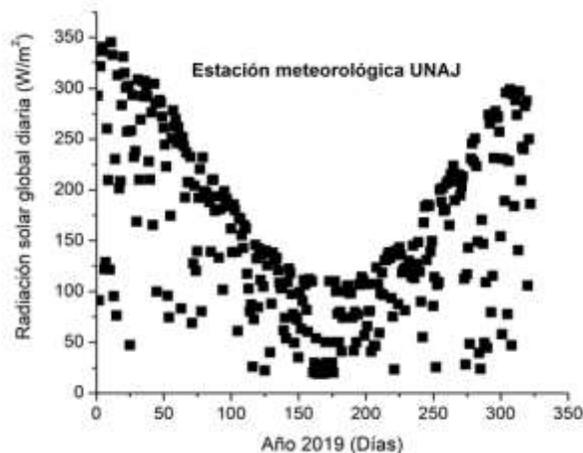
del año 2019. Considerando las tres estaciones meteorológicas, se trabajó con un total de 965 datos. Los datos del mes de septiembre de 2019 de la estación meteorológica de la UNAJ fueron utilizados para la etapa de evaluación de los modelos (30 vectores de datos), y el resto, para entrenamiento (935 vectores de datos).

De todos los parámetros de salida que arrojan las tres estaciones meteorológicas consideradas, se seleccionaron únicamente aquellos que tienen una cierta correlación con la radiación solar. Específicamente, los datos de interés (y su correspondiente unidad) son: temperatura mínima y máxima ($^{\circ}\text{C}$), precipitación (mm), humedad media (%), velocidad del viento media y máxima (km/h), presión atmosférica (atm) y radiación solar global (W/m^2). A su vez, se han incorporado al conjunto de datos parámetros relacionados con la época del año (día y mes) y con la ubicación de la estación (latitud y longitud).

En la Figura 6 se muestran los valores correspondientes a la radiación solar global diaria medida por la estación meteorológica de la UNAJ, en función de la fecha de registro. De esta manera, el día 1 es el valor medido el 01/01/2019, el día 2 es el valor correspondiente al 02/01/2019, y así sucesivamente hasta el dato 334, siendo este el valor observado el 30/11/2019. Se puede apreciar en esta figura que, como es de esperar, los menores valores de radiación solar ocurren para los valores centrales, los cuales corresponden al período de los meses entre mayo y agosto (es decir, entre los días 120 y 250 aproximadamente).

Figura 6.

Valores medidos de radiación solar global diaria en la UNAJ desde el 01/01/2019 hasta el 30/11/2019



Con el propósito de generar una estructura óptima de red neuronal, se propusieron un total de 756 modelos diferentes de RNA para la estimación de la radiación solar global diaria en la zona de influencia de la UNAJ, variando parámetros tales como:

- optimizador: entre los métodos descenso de gradiente estocástico (en inglés, *stochastic gradient descent* [SGD]), SGD con momento 0,9, y SGD con ADAM (en inglés,

adaptive moment estimation)

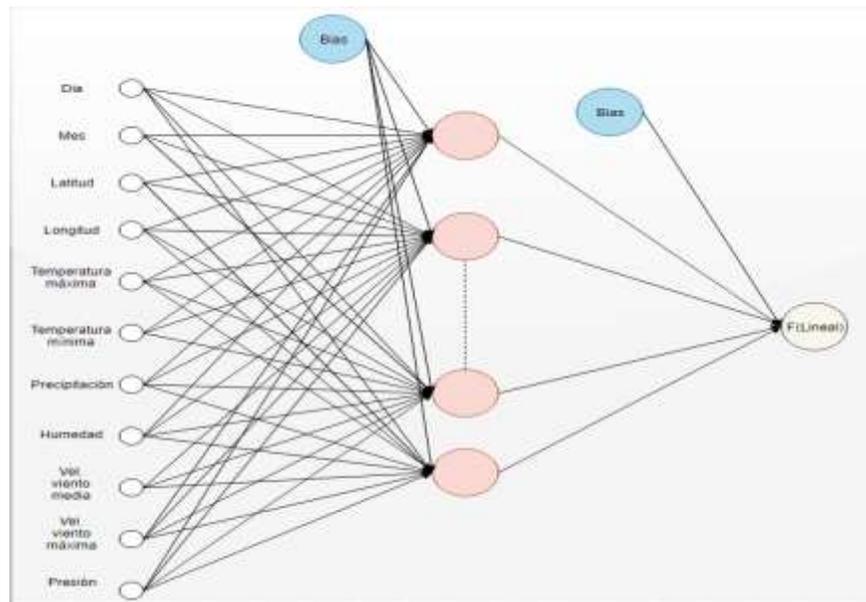
- función de activación: entre las funciones sigmoide y tangente hiperbólica
- cantidad de neuronas en la capa oculta: entre 12 y 52
- tasa de aprendizaje (en inglés, *learning rate* [LR]): entre 0,0001 y 0,1

Los valores óptimos de estos parámetros permiten seleccionar el modelo que estima el valor de salida con el mínimo error posible. Cada modelo fue entrenado durante mil iteraciones.

La Figura 7 muestra la arquitectura que presenta la RNA, con 11 variables de entrada, una capa oculta en donde se varía el número de neuronas, y una capa de salida con una única neurona y una función de activación lineal, que corresponde al valor de la radiación solar global diaria a estimar.

Figura 7.

Estructura de la red neuronal artificial utilizada



La Tabla 1 muestra los desempeños de los ocho mejores modelos obtenidos, los cuales fueron evaluados y comparados a partir de las métricas RMSE, MAE y el coeficiente de determinación R^2 .

Tabla 1.

Evaluación de resultados obtenidos en el testeo del mes de septiembre de 2019

Optimizador SGD con ADAM				
Función de Activación	Neuronas	RMSE	MAE	R²
Tangente	48	51,65	44,11	0,70
Hiperbólica	38	50,24	44,74	0,74
Sigmoide	21	45,04	38,24	0,77
	29	49,00	40,43	0,73
Optimizador SGD				
Tangente	38	40,43	33,40	0,80
Hiperbólica	44	29,13	23,15	0,91
Sigmoide	21	64,24	54,97	0,63
	30	45,04	36,92	0,77

Puede observarse en la Tabla 1 que el modelo óptimo obtenido, que estima la radiación solar global diaria con el mínimo error, correspondió al optimizador SGD, con la función de activación tangente hiperbólica, con 44 neuronas en la capa oculta, y considerando un valor de tasa de aprendizaje de 0,001. Este modelo presenta valores de RMSE y de R² de 29,13 W/m² y 0,91, respectivamente, valores comparables a los presentados en Neelamegam y Amirtham (2016).

La Figura 8 muestra los resultados de la estimación de la radiación solar global diaria utilizando el modelo óptimo obtenido, representado por los círculos rojos, y se los compara con los valores medidos por la estación meteorológica de la UNAJ durante el mes de septiembre de 2019 (círculos azules). La Figura 9 muestra el diagrama de dispersión de los valores presentados en la Figura 8, conjuntamente con la recta identidad y = x para una mejor visualización de los datos. Se puede observar que mayoritariamente los resultados calculados están por debajo de la recta identidad, lo cual permite distinguir que los errores de este modelo son producto principalmente de subestimaciones respecto de los valores de radiación solar medidos.

Figura 8.

Estimación de la radiación solar diaria durante el mes de septiembre de 2019, utilizando el modelo óptimo de RNA

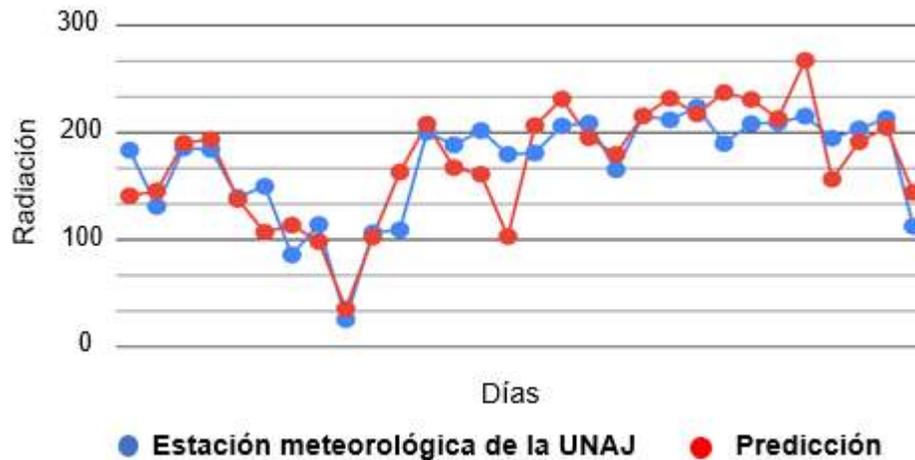
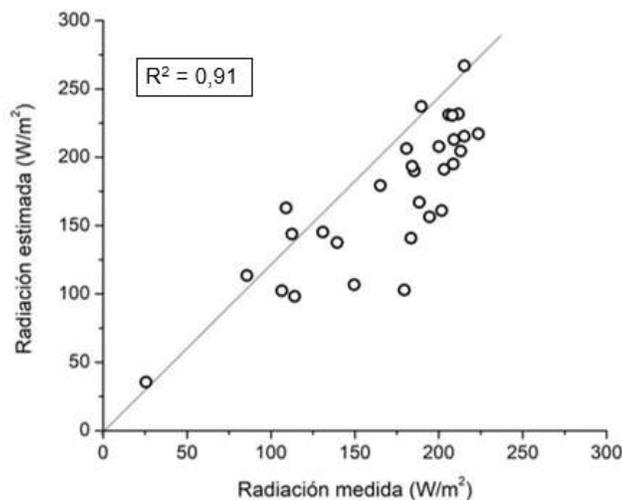


Figura 9.

Diagrama de dispersión entre la radiación solar medida y la estimada en la UNAJ durante el mes de septiembre de 2019



Los resultados completos de este análisis fueron presentados en una reunión científica con referato (Olivera *et ál.*, CONAIISI 2020).

Estimación de la radiación solar global horaria

Para un mejor aprovechamiento de la radiación solar, tanto en las actividades agroindustriales como para mejorar la eficiencia de los SFV, es más apropiado el conocimiento de la radiación solar global horaria. Por ejemplo, la confiabilidad de los SFV diseñados con base en datos de radiación solar horaria es mayor que los sistemas diseñados con base en perfiles de radiación solar diarios o mensuales (Erdinc y Uzunoglu, 2012).

Por lo tanto, en este caso, se realizó un análisis comparativo del desempeño de diferentes modelos de RNA profundas (en inglés, *deep learning*) para la estimación de la radiación solar global horaria en la localidad de Florencio Varela, provincia de Buenos Aires, bajo diferentes condiciones de cielo. Para ello fue utilizado el *dataset* horario, considerando únicamente valores de la estación meteorológica de la UNAJ, tomados cada 30 minutos entre las 6.00 y las 21.00 (30 datos por día), correspondientes al mes de enero del año 2019 (930 vectores de datos en total). Si bien es sabido que las RNA producen modelos más potentes y precisos a medida que se introducen más datos en la red, un trabajo reciente (Pang, Niu y O'Neill, 2020) utiliza datos de solo una semana para el entrenamiento de los modelos y obtiene resultados auspiciosos.

Los parámetros seleccionados para el análisis (y su correspondiente unidad) fueron: temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) y radiación solar global (W/m^2). La Figura 10 presenta los valores correspondientes a la radiación solar global en función del horario su registro, para el mes completo de enero de 2019. Puede observarse una gran dispersión de valores de radiación solar a lo largo del mes, como consecuencia de la cobertura de nubes que atenúan la radiación solar global incidente en las diferentes horas del día.

Un conjunto de 840 vectores de datos (28 días) fueron considerados para la fase de entrenamiento (90% del total), mientras que 90 vectores de datos, correspondientes a los días 7, 29 y 31 de enero de 2019, fueron utilizados para la fase de validación de los modelos. La Figura 11 muestra la variación de la radiación solar para los tres días elegidos para la fase de validación, los cuales poseen diferentes condiciones de cielo: despejado (círculos negros), parcialmente nublado (círculos azules) y mayormente nublado (círculos rojos).

Figura 10.

Valores medidos de radiación solar global horaria durante el mes de enero de 2019 en Florencio Varela

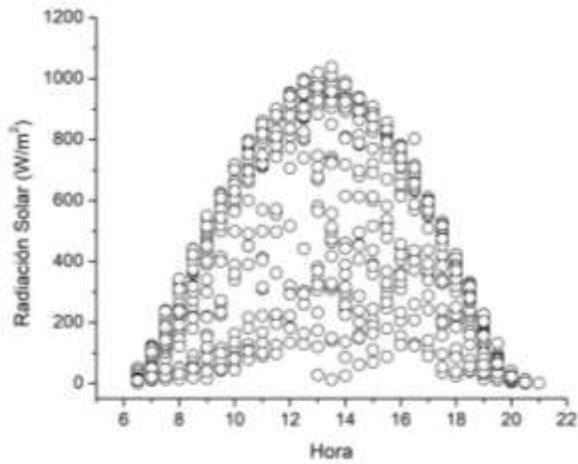
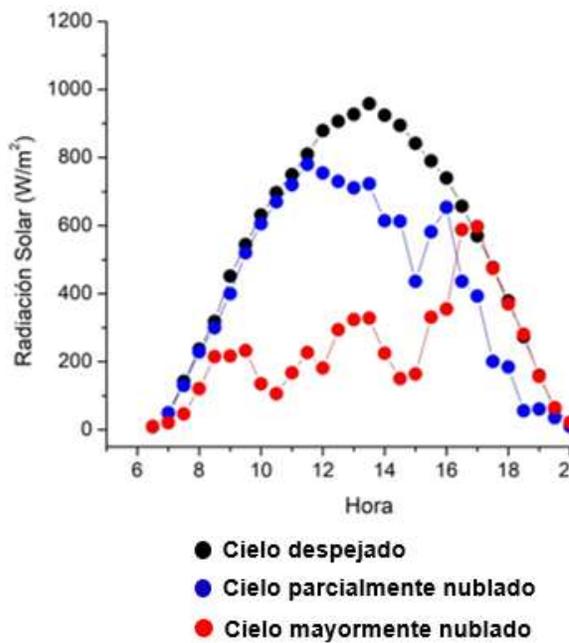


Figura 11.

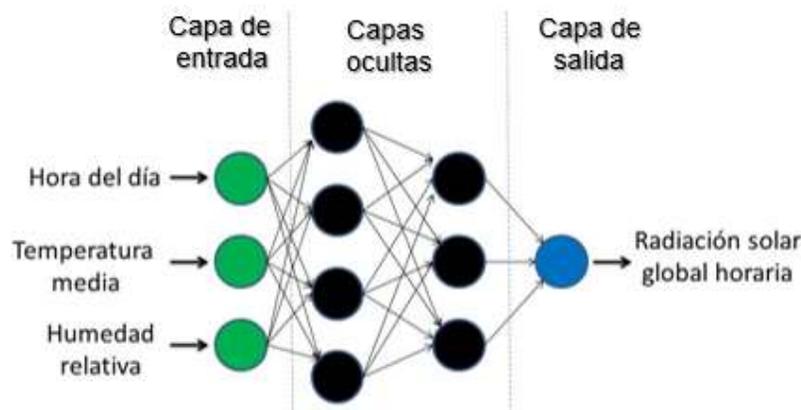
Radiación solar global horaria de los tres días del mes de enero de 2019 utilizados para la fase de validación de los modelos de RNA



A continuación, se realizó un análisis comparativo de cuatro modelos de RNA para la estimación de la radiación solar global cada 30 minutos. Por un lado, se consideraron los modelos M1 y M2, los cuales fueron entrenados con los 840 vectores de datos (28 días), sin tener en cuenta las condiciones de cielo. Y por otro lado, se consideraron los modelos M1_CD y M2_CD, los cuales solo tienen en cuenta los datos tomados con el cielo despejado (418 vectores de datos). A su vez, los modelos M1 y M1_CD tienen como variables de entrada a la hora del día y a la temperatura media, mientras que los modelos M2 y M2_CD son similares, pero con el agregado de la humedad relativa como variable de entrada. La Figura 12 muestra un esquema de los modelos M2 y M2_CD.

Figura 12.

Arquitectura de la red neuronal artificial como la utilizada en este estudio para los modelos M2 y M2_CD



Para la clasificación del cielo, se utilizó el índice de claridad K_t , el cual es un parámetro muy valioso y ampliamente utilizado para caracterizar las diferentes condiciones de cielo en un lugar específico (Okogbue, Adedokun y Holmgren, 2009). Además, posibilita la comparación entre diferentes épocas del año, e incluso entre localidades con diferentes alturas sobre el nivel del mar (Salazar, Saravia y Romero, 2007). Se lo define como la razón entre la radiación solar global registrada en la superficie terrestre y la radiación solar extraterrestre (Grossi Gallegos, 2004). De esta manera, K_t indica qué tan clara es la atmósfera en ese instante, y es sensible a la presencia de nubosidad y polución atmosférica. Los valores de K_t varían entre 0 y 1 e indican qué fracción de la radiación solar extraterrestre es la que llega a la estación meteorológica a los diferentes instantes en los que se tomaron los valores de radiación solar global. En nuestro análisis se adoptó la clasificación (Okogbue, Adedokun y Holmgren, 2009; Yousif, Quecedo y Santos, 2013):

- cielo nublado (CN): $K_t < 0,2$

- cielo parcialmente nublado (CPN): $0,2 < K_t < 0,6$
- cielo despejado (CD): $K_t > 0,6$

Para el entrenamiento de los modelos se generó una estructura de red neuronal densa *feedforward*, donde todas las neuronas de una capa están conectadas a todas las neuronas de la siguiente, sin que exista retroalimentación alguna. Las principales características del modelo óptimo obtenido son:

- optimizador: RMSProp, el cual es un algoritmo estocástico adaptativo para el entrenamiento de redes neuronales profundas
- función de activación: ReLU (unidades lineales rectificadas)
- capas ocultas: tres capas densas
- cantidad de neuronas en las capas ocultas: 64, 24 y 16 en la primera, segunda y tercera capa, respectivamente

La Figura 13 presenta el error de estimación para los cuatro modelos considerados, tomando el día 31 de enero de 2019 como día de validación. Se puede observar, a pesar de la poca cantidad de datos utilizados, una reducción significativa de los errores al entrenar los modelos únicamente con valores de cielo despejado. La Tabla 2 presenta los valores de las métricas obtenidas para cada uno de los modelos.

Figura 13.

Errores de estimación de los modelos M1_CD y M2_CD entrenados con datos correspondientes a $K_t > 0,6$. Comparación con los errores de estimación de los modelos M1 y M2

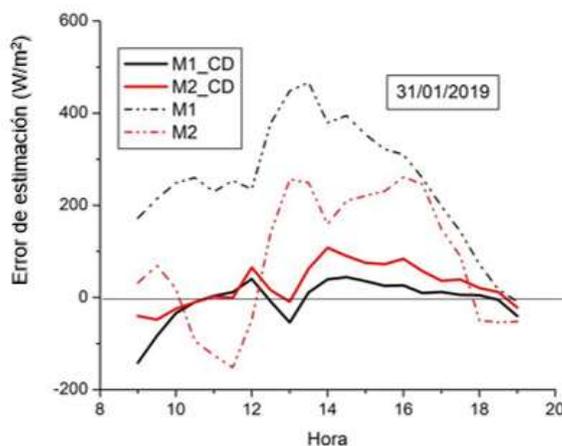


Tabla 2.

Valores de las métricas obtenidas, utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos propuestos

Modelo	R ²	MAE	RMSE	CV (RMSE) (%)
M1	0,62	132,7	180,8	48,8
M2	0,75	98,9	147,9	39,9
M1_CD	0,96	30,8	44,3	6,5
M2_CD	0,94	42,6	52,5	7,7

Un análisis similar al presentado para los datos categorizados como CD fue llevado a cabo también para los días CPN y CN, aunque los errores de estimación obtenidos son comparables a los de los modelos M1 y M2, lo que implica que en estos casos la poca cantidad de datos sí es un factor clave para la obtención de mejores modelos.

Los resultados completos de este análisis fueron publicados en una revista científica con referato (Olivera *et al.*, 2020b).

Diseño y optimización de dispositivos fotovoltaicos

En esta subsección, se presentan los resultados más relevantes del análisis desarrollado para el estudio de celdas solares basadas en diferentes materiales y tecnologías de fabricación a través de la modelización y simulación numérica. El análisis teórico presentado aquí es un paso previo casi obligado para la fabricación de los dispositivos, con un costo y tiempo muy inferiores con respecto a su desarrollo experimental.

Evaluación teórica del comportamiento de celdas solares de perovskita

Uno de los dispositivos fotovoltaicos que ha cobrado especial relevancia en los últimos años son las celdas solares de perovskita (CSP). Estas conllevan una tecnología que promete revolucionar la industria fotovoltaica. Las principales características que las hacen muy atractivas son su gran coeficiente de absorción (gran capacidad para absorber la luz incidente), la alta movilidad de los portadores de carga y sus extensas longitudes de difusión. Por su parte, a diferencia de los materiales semiconductores rígidos como el silicio, que requiere de una gran cantidad de procesos para convertirlos en celdas solares, las CSP son más económicas, mecánicamente flexibles y, desde la perspectiva de su proceso de fabricación, más simples. De esta forma, las CSP poseen menor tiempo de retorno energético

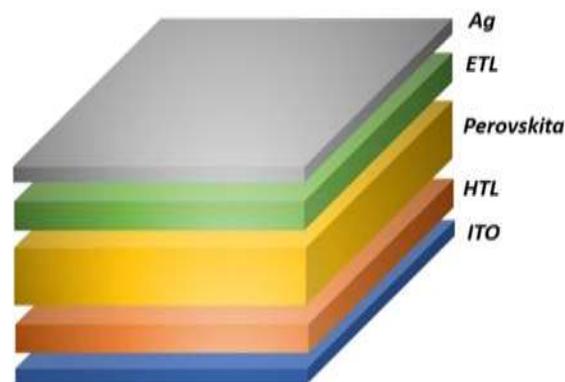
que las celdas solares de silicio, es decir, el tiempo necesario para que un material genere la misma cantidad de energía que se gasta en su producción.

Las CSP, incluidas dentro de las celdas solares de película delgada de tercera generación, constan de una capa de perovskita, que se encuentra en el medio entre una capa de transporte de huecos tipo p (en inglés, *hole transporting layer* [HTL]) y una capa de transporte de electrones tipo n (en inglés, *electron transporting layer* [ETL]).

En particular, se llevó a cabo un análisis comparativo de diferentes combinaciones de CSP totalmente inorgánicas con estructura invertida ITO/HTL/perovskita/ETL/Ag, donde la capa de perovskita es de la forma $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$, con x en el rango de 0 a 3; para la capa HTL se consideraron los materiales NiO, Cu_2O , CuSCN y CuI; mientras que para la capa ETL, se utilizaron ZnO, TiO_2 y SnO_2 . La Figura 14 muestra la configuración del dispositivo analizado en este estudio.

Figura 14.

Arquitectura del dispositivo utilizado en las simulaciones



Se investigó sobre los efectos que tienen sobre la eficiencia de los dispositivos, la variación de parámetros de la capa de perovskita, tales como el espesor, la densidad de átomos aceptores y la densidad de defectos, con el fin de obtener las condiciones óptimas de diseño que permitirían lograr mayores eficiencias que las actuales.

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos para los parámetros de salida corriente de cortocircuito (en inglés, *short-circuit current density* [J_{SC}]), tensión de circuito abierto (en inglés, *open-circuit voltage* [V_{OC}]), factor de llenado (en inglés, *fill factor* [FF]) y eficiencia de conversión de energía (en inglés, *power conversion efficiency* [PCE]) para las doce combinaciones consideradas.

Tabla 3.

Comparación del desempeño de los dispositivos con las diferentes alternativas ETL / HTL

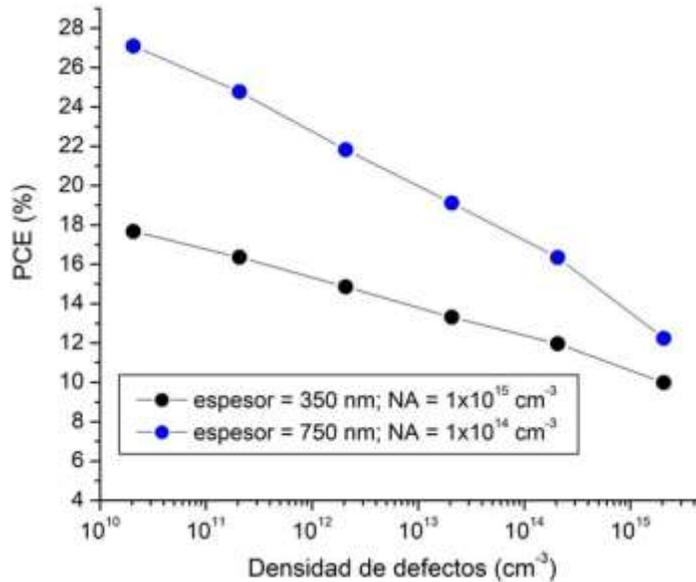
ETL / HTL	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (V)	FF (%)	PCE (%)
ZnO / NiO	13,44	1,13	77,55	11,77
SnO ₂ / NiO	13,42	1,13	77,55	11,75
TiO ₂ / NiO	13,44	1,12	77,24	11,67
ZnO / Cu ₂ O	12,98	1,13	78,44	11,53
SnO ₂ / Cu ₂ O	12,97	1,13	78,44	11,51
TiO ₂ / Cu ₂ O	12,98	1,12	78,49	11,47
ZnO / CuSCN	13,44	1,14	73,25	11,19
SnO ₂ / CuSCN	13,42	1,14	73,26	11,18
TiO ₂ / CuSCN	13,44	1,13	72,24	11,01
ZnO / CuI	13,46	1,13	78,61	11,96
SnO ₂ / CuI	13,45	1,13	78,61	11,94
TiO ₂ / CuI	13,46	1,12	78,50	11,89

Los resultados obtenidos muestran que la CSP de estructura ITO/CuI/CsPbI_xBr_{3-x}/ZnO/Ag tiene la mayor PCE. A continuación, se calcularon los valores óptimos de espesor (750 nm) y de densidad de átomos aceptores ($1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) para este dispositivo. A su vez, la Figura 15 muestra la comparación de la eficiencia en función de la densidad de defectos, para el dispositivo originalmente analizado (círculos negros) y el dispositivo con las condiciones óptimas de diseño (círculos azules). Puede observarse la notable mejora que podría obtenerse en el desempeño de las CSP totalmente inorgánicas en el caso que pudiera disminuirse la densidad de defectos (o aumentarse la longitud de difusión). Específicamente, para el caso extremo de $N_T = 2,07 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (100 μm de longitud de difusión) la eficiencia óptima teórica alcanzada es de 27,1%.

Los resultados completos de este análisis fueron publicados en una revista científica con referato (Pinzón *et ál.*, 2020) y presentados en una reunión científica con referato (Martínez *et ál.*, 2020).

Figura 15.

Variación de PCE para diferentes densidades de defectos en la capa de perovskita



Extracción de parámetros de celdas solares mediante algoritmos genéticos

En este caso, se utilizó la denominada “modelización inversa”, a través de un método basado en algoritmos genéticos, para obtener información técnica de los dispositivos fotovoltaicos, mediante el ajuste de modelos teóricos con curvas experimentales de salida de los dispositivos, tales como las curvas de I-V y la de EQE. La curva I-V provee información acerca de parámetros eléctricos tales como corriente de cortocircuito, tensión de circuito abierto, potencia máxima de salida, resistencia serie, resistencia paralela, corrientes inversas de saturación, fotocorriente y factor de idealidad. A su vez, las características ópticas de una celda solar, más precisamente la EQE, contiene información de las propiedades de transporte de los portadores minoritarios, tales como tiempos de vida media (o longitud de difusión) y velocidades de recombinación superficial. El conocimiento de estos parámetros es esencial para investigar los factores que limitan el rendimiento de los dispositivos fotovoltaicos y mejorar el diseño, la optimización y el proceso de fabricación de estos. Los principales resultados obtenidos en esta línea de investigación han sido publicados en dos revistas internacionales (Cappelletti *et ál.*, 2018; Cappelletti *et ál.*, 2019) y presentados en una reunión científica nacional (Cappelletti *et ál.*, 2018).

Discusión

El desarrollo de un sistema inteligente de monitoreo, control y gestión, completamente autónomo y aplicado a cultivos intensivos, permite obtener información precisa de magnitudes climatológicas, del estado del suelo, del agua y del nivel de radiación solar. Un sistema de estas características es sumamente útil para la zona de influencia de la

UNAJ, dado que la información recolectada por el sistema permite advertir sobre el comportamiento actual y futuro del cultivo en cuestión, tomar decisiones apropiadas, planificar proyectos, generar alarmas tempranas, o llevar a cabo tareas de mejoramiento en pos de obtener el rendimiento óptimo de los recursos existentes. Además de prevenir cualquier tipo de daño causado por problemas que, si no fueran notificados, provocarían daños irreparables. Por ejemplo, a partir de un análisis de la información obtenida, es posible el estudio de fenómenos tales como una plaga, una baja producción, baja calidad de los productos, entre otros.

Por su parte, el conocimiento preciso de la radiación solar en un determinado instante y lugar es un factor clave para la optimización de sistemas que aprovechen la energía solar como recurso energético. Los valores de radiación solar estimados podrían ser utilizados por ejemplo como una nueva variable de entrada a incorporar en el sistema inteligente aplicado a cultivos intensivos, para mejorar el rendimiento y desarrollo de estos. De esta manera, a partir de dichos valores estimados, en el caso de no encontrarse dentro de los límites esperados, se deberán realizar determinadas acciones, dado que la baja disponibilidad o el exceso de radiación solar puede producir daños irreparables en los cultivos. Al mismo tiempo, estos modelos de predicción podrían aplicarse en lugares donde no se dispone de valores de radiación solar medidos, o bien se cuente con un número limitado de datos previos. Además, pueden ser útiles para la evaluación y dimensionamiento de nuevos emprendimientos fotovoltaicos; o para restaurar un conjunto de datos de radiación solar en caso de tener datos faltantes debido a interrupciones del sistema de monitoreo; o bien, para utilizar su valor en un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia de SFV.

Finalmente, respecto al diseño y a la optimización de dispositivos fotovoltaicos, los resultados teóricos obtenidos serán de gran utilidad para la fabricación y caracterización de celdas solares de perovskita totalmente inorgánicas. Sin embargo, teniendo en cuenta que los resultados obtenidos representan una predicción del comportamiento de los dispositivos analizados, la posibilidad de reproducir experimentalmente una predicción prometedora va a depender tanto de la madurez de la tecnología como de poder tener un control preciso sobre las características de los materiales involucrados.

Conclusiones

El desarrollo del proyecto ha contribuido de manera muy satisfactoria al cumplimiento del objetivo general planteado, es decir, la generación del conocimiento y de herramientas tecnológicas basadas en el internet de las cosas, la inteligencia artificial y los recursos renovables, para brindar soluciones innovadoras y de bajo costo a las principales problemáticas existentes en la actividad agroindustrial de la zona de influencia de la UNAJ. La utilización de estas herramientas nos ha permitido: diseñar e implementar un sistema inteligente aplicado a cultivos intensivos, proponer modelos para la estimación de la

radiación solar global diaria y horaria, así como también diseñar y optimizar dispositivos fotovoltaicos basados en diferentes materiales y tecnologías de fabricación.

A partir de la investigación llevada a cabo y de las herramientas desarrolladas durante la ejecución del proyecto, se alcanzó una extensa producción científico-académica a través de la presentación de numerosos trabajos en reuniones científicas con referato y publicaciones en revistas nacionales e internacionales con referato. A su vez, a lo largo del proyecto se ha contribuido de manera muy satisfactoria a la formación de recursos humanos, tanto de estudiantes como de docentes.

A continuación, se presentan las conclusiones más significativas para cada una de las aplicaciones consideradas. En cuanto al diseño y a la implementación de un sistema inteligente aplicado a cultivos intensivos, de manera eficiente se ha desarrollado un prototipo experimental de un sistema de monitoreo, control y gestión, completamente autónomo, que permite obtener información precisa de la temperatura, la humedad del suelo y la iluminación. Luego, con base en esta información el sistema podrá generar alarmas tempranas, que se enviarán a las personas, en el caso que dichos parámetros se aparten de sus valores esperados. A su vez, fue implementada una red de sensores, distribuidos en diferentes partes e interconectados entre sí, que le envían la información a un nodo central, el cual se encarga de procesar la información recibida por los demás y almacenarla en una base de datos en la nube. Esta red les posibilita a las personas disponer de más de un sitio para tomar las medidas de los parámetros de interés. Por lo tanto, el sistema, que puede ser implementado en huertas de la región tanto a cielo abierto como en invernaderos, cumple con los requerimientos planteados originalmente a nivel vinculación con el medio físico (por contar sensores y actuadores) y vinculación con la persona (debido al sistema web y de mensajería para las alarmas). Si bien, por la pandemia de la COVID-19 no se han podido llevar a cabo aún las pruebas del sistema en campo, a partir de las pruebas locales realizadas se puede afirmar que el sistema desarrollado permitirá un mejor aprovechamiento de los recursos, como por ejemplo, aumentar los niveles de producción, disminuir los costos correspondientes, mejorar la calidad de los productos, prevenir plagas, promover un uso racional y eficiente de la energía y la utilización de energías alternativas, entre otros beneficios.

Respecto de la estimación de la radiación solar global, se han desarrollado diferentes modelos de RNA para evaluar su valor en el territorio de la UNAJ, tanto para la radiación solar global diaria como la horaria, siendo esta última la de mayor interés para las actividades agroindustriales y fotovoltaicas. Las variables de entrada a los modelos son datos históricos de magnitudes meteorológicas de sencilla adquisición, tales como temperatura y humedad relativa, entre otras, las cuales poseen una cierta correlación con la radiación solar. Los resultados obtenidos muestran que la precisión de los modelos estudiados es fuertemente dependiente del tipo de cielo considerado, dado que cuando los modelos son entrenados con

el conjunto completo de los datos preprocesados, es decir, considerando todas las condiciones de cielo (despejado, parcialmente nublado y mayormente nublado), los errores obtenidos son apreciables. Esto se debe a la poca cantidad de datos utilizados para el entrenamiento de los modelos y a la gran dispersión de valores de radiación solar global medidos. Mientras que cuando los modelos son entrenados únicamente con datos clasificados como cielo despejado, de acuerdo con el índice de claridad $K_t > 0,6$, el error de estimación disminuye considerablemente, a pesar del reducido número de datos utilizado.

Finalmente, para el diseño y la optimización de dispositivos fotovoltaicos, se han desarrollado dos estudios diferentes, los cuales contribuyen a la utilización de energías alternativas, en este caso, energía solar, con las ventajas que ello representa en cuanto a un bajo costo operativo, con mínimo impacto ambiental, disponibilidad en el sitio de consumo y sostenibilidad. Por un lado, se llevó a cabo un análisis comparativo de diferentes combinaciones de CSP totalmente inorgánicas con estructura invertida ITO/HTL/perovskita/ETL/Ag, donde la capa de perovskita es de la forma $\text{CsPbI}_x\text{Br}_{3-x}$, con x en el rango de 0 a 3. Para ello se utilizaron programas de simulación de dispositivos fotovoltaicos de libre acceso, los cuales permiten obtener un conocimiento detallado y preciso para predecir y mejorar su respuesta bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Los resultados teóricos obtenidos serán de gran utilidad para la fabricación y caracterización de CSP totalmente inorgánicas. Y, por otro lado, se utilizó la modelización inversa para extraer información de parámetros de interés de dispositivos fotovoltaicos, que permita analizar su diseño, fabricación y funcionamiento en detalle, con el objetivo de comprender, modificar y mejorar dicho dispositivo. Para ello se utilizaron técnicas basadas en algoritmos genéticos, para la extracción de parámetros de celdas solares, tales como resistencia serie, corrientes inversas de saturación y las propiedades de transporte de los portadores minoritarios (longitud de difusión y velocidad de recombinación superficial), mediante el ajuste de modelos teóricos con curvas experimentales de salida de los dispositivos, tales como las curvas de I-V y la de EQE.

Referencias

- Assi, A., Jama, M. y Al-Shamisi, M. (2012). Prediction of Global Solar Radiation in Abu Dhabi. *International Scholarly Research Network ISRN Renewable Energy*.
- Cabral, L., Negro, G., Vigil, E., Lo, E., Fain, F., Atía, J., Osio, J. y Cappelletti, M. (2019). *Sistema de seguimiento y control de parámetros para cultivos intensivos bajo cubierta*. X Congreso de Microelectrónica Aplicada (μ EA 2019). San Martín, Buenos Aires, Argentina.
- Cappelletti, M., Casas, G. A., Cédola, A.P., Peltzer y Blancá, E.L. y Soucase, B. M. (2018). Study of the reverse saturation current and series resistance of p-p-n perovskite solar

- cells using the single and double-diode models. *Superlattices and Microstructures*, 123, pp. 338-348.
- Cappelletti, M., Cédola, A. P., Olivera, L. M., Casas, G. A., Osio, J. R. y Peltzer y Blancá, E. L. (2019). Extraction of the minority carrier transport properties of solar cells using the Hovel model and genetic algorithms. *Measurement Science and Technology*, 31(2).
- Cappelletti, M., Cédola, A. P., Osio, J. R., Casas, G. A. y Peltzer y Blancá, E. L. (2018). Método basado en algoritmos genéticos y el modelo de Hovel para la extracción de parámetros de la eficiencia cuántica externa en celdas solares. *Actas de XLI Reunión de Trabajo de ASADES*. Córdoba, Argentina. 6, pp. 03.115-03.126.
- Casas, G., Cappelletti, M. A., Cédola, A. P., Soucase, B. M., Peltzer y Blancá, E. L. (2017). Analysis of the power conversion efficiency of perovskite solar cells with different materials as Hole-Transport Layer by numerical simulations. *Superlattices and Microstructures*, 107, 136-143.
- Çoban, V. y Onar, S. (2020). Solar radiation prediction based on machine learning for Istanbul in Turkey. En C. Kahraman *et ál.*, *INFUS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing* (vol. 1029). Springer.
- Erdinc, O. y Uzunoglu, M. (2012). Optimum design of hybrid renewable energy systems: Overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), pp. 1412-1425.
- Grossi Gallegos, H. (2004). *Notas sobre radiación solar*. Universidad Nacional de Luján, Departamentos de Ciencias Básicas.
- Haider, S., Anwar, H. y Wang, M. (2019). Theoretical Device Engineering for High-Performance Perovskite Solar Cells Using CuSCN as Hole Transport Material Boost the Efficiency Above 25%. *Physica Status Solidi*, A 216.
- Harrington, P. (2012). *Machine Learning in Action*. Manning Publications.
- Hromek, E., Gómez, M., Olivera, L., Salina, M., Osio, J., Cappelletti, M. y Morales, M. (2019). Sistema de control y monitoreo remoto de variables en aplicaciones agroindustriales. *7° Congreso Nacional de Ingeniería en Informática / Sistemas de Información (CoNaIISI 2019)*. San Justo, Buenos Aires, Argentina.
- Jordan, M. y Mitchell, T. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), pp. 255-260.
- Kaplanis, S. y Kaplani, E. (2010). Stochastic prediction of hourly global solar radiation for Patra, Greece. *Applied Energy*, 87, pp. 3748-3758.
- Khatib, T. y Elmenreich, W. (2015). A Model for Hourly Solar Radiation Data Generation from Daily Solar Radiation Data Using a Generalized Regression Artificial Neural Network. *International Journal of Photoenergy*.
- Leal, S., Tiba, C. y Piacentini, R. (2009). Modelos estadísticos para determinação da

- irradiação solar UV diária no estado de Pernambuco. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, pp. 11.41-11.47.
- Lin, L., Jiang, L., Li, P., Xiong, H., Kang, Z., Fan, B. y Qiu, Y. (2020). Simulated development and optimized performance of CsPbI₃ based all-inorganic perovskite solar cells. *Solar Energy*, 198, pp. 454-460.
- Martínez, N., Pinzón, C., Casas, G., Alvira, F. y Cappelletti, M. (2020). Análisis de celdas solares de perovskitas totalmente inorgánicas basadas en CsPbI_xBr_{3-x} mediante simulaciones computacionales empleando SCAPS-1D. 105ª Reunión de la Asociación Física Argentina. Modalidad Virtual.
- Neelamegam, P. y Amirtham, V. (2016). Prediction of solar radiation for solar systems by using ANN models with different back propagation algorithms. *Journal of Applied Research and Technology*, 14, pp. 206-214.
- Okogbue, E., Adedokun, J. y Holmgren, B. (2009). Hourly and daily clearness index and diffuse fraction at a tropical station, Ile-Ife, Nigeria. *International Journal of Climatology*, 29, pp. 1035-1047.
- Olivera. L., Atía, J., Amet, L., Osio, J., Morales, M. y Cappelletti, M. (2020a). Uso de redes neuronales artificiales para la estimación de la radiación solar horaria bajo diferentes condiciones de cielo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 24, pp. 232- 243.
- Olivera. L., Atía, J., Osio, J., Morales, M. y Cappelletti, M. (2020b). Estimación de la radiación solar global diaria a través de modelos de redes neuronales artificiales. 8º Congreso Nacional de Ingeniería en Informática / Sistemas de Información (CoNaIISI 2020). San Francisco, Córdoba, Argentina.
- Osio. J., Cappelletti, M., Salina, M., Gómez, M., Navarro, L., Salvatore, J., Alonso, D., Encinas, D. y Morales, M. (2020). Tecnologías de la información y las comunicaciones mediante IoT aplicadas a soluciones en el medio productivo y medioambiental. *XXII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2020)*. El Calafate, Santa Cruz, Argentina.
- Osio. J., Cappelletti, M., Suárez, G., Navarro, L., Ayala, F., Salvatore, J., Alonso, D., Encinas, D. y Morales, M. (2019). Diseño de aplicaciones de IoT para la solución de problemas en el medio socio productivo. *XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019)*. San Juan, Argentina.
- Pandey, C. y Katiyar, K. (2013). Solar Radiation: Models and Measurement Techniques. *Journal of Energy*.
- Pang, Z., Niu, F. y O'Neill, Z. (2020). Solar radiation prediction using recurrent neural network and artificial neural network: A case study with comparisons. *Renewable Energy*, 156, pp. 279-289.
- Pinzón. C., Martínez, N., Casas, G., Alvira, F. y Cappelletti, M. (2020). Evaluación teórica del comportamiento de celdas solares de perovskita invertida totalmente

- inorgánicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 24, pp. 139-148.
- Polo Martínez, J. (2010). Optimización de modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Raichijk, C., Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2005). Evaluación de un método alternativo para la estimación de valores medios mensuales de irradiación global en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9, pp. 11.05-11.08.
- Salazar, G., Saravia, L. y Romero, G. (2007). Comparación de datos esporádicos de irradiancia medidos simultáneamente en dos localidades de la provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 11, pp. 73-79.
- Taretto, K. (2015). *Celdas solares, teoría, ensayo y diseño*. Nueva Librería.
- Yousif, C., Quecedo, G. y Santos, J. (2013). Comparison of solar radiation in Marsaxlokk, Malta and Valladolid, Spain. *Renewable Energy*, 49, pp. 203-206.