

Consideraciones para la implantación del modelo agrivoltaico

Rafael López Luque y José Cristóbal Ramírez Faz

Grupo de Investigación TEP-215, Universidad de Córdoba

1. Introducción

En el artículo anterior se ha mostrado cómo la agrivoltaica representa una confluencia innovadora entre la agricultura y la obtención de energía renovable. Se trata de una solución sostenible que busca abordar los desafíos globales del cambio climático, la seguridad alimentaria y la transición energética. Múltiples autores coinciden en datar el nacimiento de esta tecnología en 2012 cuando Dupraz y col. (Dupraz *et al.*, 2011) retomaron el concepto inicialmente estudiado por Goetzberger y Zastrow (Goetzberger & Zastrow, 2007) referente al cultivo bajo módulos fotovoltaicos. Así, se entiende cómo la mayor parte de los desarrollos científicos y tecnológicos asociados a esta nueva forma productiva apenas cuentan con diez años de antigüedad. En los primeros años, las instalaciones agrivoltaicas utilizaban tecnología meramente fotovoltaica, sin embargo, el paulatino crecimiento y desarrollo de la agrivoltaica ha dado lugar al desarrollo de soluciones tecnológicas dedicadas. En este artículo se describen las tecnologías más significativas, los métodos de estudio, incluyendo los índices así como las perspectivas de desarrollo en Europa y España.

2. Desarrollos tecnológicos agrivoltaicos

La implementación exitosa fundamentalmente en EEUU, Francia y Alemania de sistemas agrivoltaicos ha dado lugar a tecnologías avanzadas para equilibrar las demandas de generación de energía y agricultura. Los paneles fotovoltaicos, fijos o sobre seguidores, se diseñan, ubican y manejan estratégicamente considerando el impacto en la productividad agrícola, optimizando la sombra y la penetración de luz solar para los cultivos maximizando la producción energética y beneficiando los requerimientos específicos de los cultivos.

Además, el desarrollo tecnológico propio de la agrivoltaica ha venido acompañado de la modernización de la agricultura basada en la monitorización en tiempo real de variables (como la radiación solar, la temperatura, la humedad del suelo y el consumo de agua), *bigData* o gemelos digitales. Para ello, se integran sensores *IoT* (Internet de las Cosas), drones agrícolas, robots y sistemas de gestión basados en inteligencia artificial para analizar los datos y tomar decisiones precisas que optimicen ambos usos del terreno.

2.1. Estructuras de montaje y diseños optimizados para sistemas agrivoltaicos

2.1.1 Tipologías

Uno de los elementos definitorios de las instalaciones agrivoltaicas lo encontramos en la estructura portante de los colectores y, por tanto, el modo en que se distribuye el espacio disponible entre el cultivo y los colectores. En la actualidad se reconocen diferentes modelos de convivencia de plantas fotovoltaicas y cultivos que prácticamente se identifican con tecnologías desarrolladas específicamente para cada una.

En la Tabla 1 se establece la clasificación general de sistemas agrivoltaicos:

Tabla 1. Tipologías de instalaciones

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	
Abiertos	<p>Elevados:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colectores fijos• Colectores con seguidores <p>Interespacio entre colectores:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colectores fijos• Colectores con seguidor
Cerrados	<p>Invernaderos y umbráculos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Colectores fijos exteriores/interiores• Seguidores exteriores/interiores

Los primeros sistemas en presentarse fueron los sistemas abiertos y elevados. En ellos los módulos fotovoltaicos se disponen sobre estructuras elevadas de modo que se permite el cultivo bajo los colectores. A las estructuras se les exige una altura mínima que permita la circulación de la maquinaria agrícola propia del cultivo. Como altura límite, las normas definitorias establecen valores mínimos de 2,10 m. Las estructuras portantes, normalmente de hierro galvanizado, deben cimentarse de modo que la interferencia con el terreno cultivable sea mínima. A título de ejemplo, la Figura 1 muestra la instalación realizada en Heggelbach por los investigadores del proyecto APV-RESOLA con la colaboración de Fraunhofer Institute. Se trata de una de las primeras instalaciones experimentales realizadas basada en colectores fijos y elevados.

Figura 1. Sistema agrivoltaico en Heggelbach



Fuente: © Fraunhofer ISE.

Figura 2. Sistema agrivoltaico en Aranda de Duero basado en seguidores solares sobre estructura elevada sobre cultivo de vid



Fuente: © Powerfulltree.

Las estructuras elevadas se utilizan frecuentemente para instalar seguidores solares como se muestra en la Figura 2. Este tipo de instalaciones resultan más flexibles a la hora de controlar el microclima de los cultivos, ya que el movimiento de los seguidores debe realizarse con objeto de controlar los niveles de irradiancia en el cultivo, favoreciendo o limitando el acceso a la radiación según las necesidades del cultivo. La Figura 2 muestra una imagen de la instalación desarrollada por Powerfultree en un viñedo situado en Aranda de Duero.

Los proyectos con estructura elevada requieren un estudio previo de detalle de los niveles de radiación disponible en superficie y de cómo ésta depende de la geometría de la estructura y de la disposición de los módulos fotovoltaicos sobre la misma. Comercialmente, las empresas MetalFrame Renovables (MetalFrame Renovables, n.d.) y Sunsupport (SunSupport, n.d.) diseñan e instalan estructuras agrivoltaicas exprofeso que permiten obtener diferentes patrones de transmisión radiativa en función de las necesidades del cultivo.

Las empresas francesas Ombrea y RES han desarrollado un concepto alternativo al de seguidores solares elevados como elemento de protección de los cultivos. Para ello, se utilizan módulos fotovoltaicos que se pueden deslizar sobre raíles elevados constituyendo generadores fotovoltaicos retractiles y un software de control equipado con tecnologías de inteligencia artificial (IA) que permite anticiparse y reaccionar ante condiciones climáticas desfavorables (Ombrea, n.d.)

Las plantas agrivoltaicas abiertas en las que el espacio cultivable se limita al espacio entre líneas suponen un menor grado de tecnificación, un menor coste así como un menor grado de control ambiental del cultivo. La Figura 3 muestra un ejemplo de este tipo de instalación.

Figura 3. Sistema agrivoltaico abierto entre colectores estáticos



Una variante respecto de estos sistemas se propuso por Next2Sun AG, que ha desarrollado y patentado un sistema estructural de acero, denominado Next2Sun Mounting Systems (Figura 3), diseñado específicamente para instalaciones agrivoltaicas, con el objetivo de minimizar el sombreado que los módulos proyectan sobre los cultivos (Next2Sun, n.d.). La unidad básica del sistema está compuesto por dos postes y tres vigas que enmarcan dos módulos bifaciales encapsulados en vidrio por ambas caras en posición vertical. La altura máxima de la estructura es ajustable para garantizar que las células más bajas de los colectores no queden sombreadas. De este modo, los colectores solares bifaciales en orientación vertical se integran en configuraciones de agrivoltaica interespacial, dispuestos en filas paralelas y frecuentemente orientados en dirección Este-Oeste o Norte Sur (Next2Sun, n.d.). En estas instalaciones, con la separación adecuada entre las filas de colectores, se facilita el uso de maquinaria agrícola y se optimiza el terreno para el cultivo, además de protegerlo del viento. Sin embargo, la generación eléctrica se concentra en las primeras y últimas horas del día, siendo mínima o nula al mediodía. Esto exige evaluar el rendimiento de estos sistemas agrivoltaicos para determinar su rentabilidad.

Dentro de las instalaciones agrivoltaicas de cultivo en el espacio de intercolectores destacan las que utilizan sistemas de seguimiento de eje horizontal en dirección N-S utilizando las calles para cultivo en seto o en alineación de árboles en dirección N-S. Tecnológicamente, esta configuración aprovecha las ventajas del fuerte desarrollo tecnológico experimentado durante los últimos años por las técnicas de cultivo de frutales en seto. Igualmente, la tecnología fotovoltaica de los campos de seguidores se encuentra madura y contrastada. La geometría de instalación resultante resulta fácilmente mecanizable por las distancias entre setos y colectores, así como por el hecho de que los seguidores permiten, cuando inclinan al máximo los colectores, el uso de la maquinaria propia de los cultivos. Una instalación de esta índole se ha construido por Iberdrola en Guadamur (Toledo).

En la actualidad, la Agrivoltaica también muestra un amplio espacio de desarrollo en la agricultura en invernadero. Sin embargo, todavía es necesario resolver los problemas de manejo de estos sistemas, siendo el principal analizar el impacto del sombreado parcial en la reducción del rendimiento de los cultivos. Diversos estudios han mostrado que un sombreado parcial moderado no necesariamente tiene un efecto significativo en la disminución del rendimiento agrícola. Así, Kitta y col. (Kittas *et al.*, 2012) recomiendan que los porcentajes de sombreado no superen un 20 % para el cultivo de pimiento en clima mediterráneo. Aroca-Delgado y col. (Aroca-Delgado *et al.*, 2018) concluyeron que un sombreado del 10 % mediante paneles fotovoltaicos fijos no afecta ni el rendimiento ni la calidad de los tomates. En esta línea, en el estudio experimental de López-Díaz y col. (López-Díaz *et al.*, 2020) analizaron el efecto de tres niveles de sombreado (15 %, 30 % y 50 %) en un cultivo de tomate en invernadero mediterráneo, observando que un sombreado moderado (hasta el 30 %) no impactó significativamente la producción, mientras que porcentajes más altos sí redujeron tanto el rendimiento como la calidad del fruto. Cossu *et al.* (Cossu *et al.*, 2017) investigaron la producción de tomates Cherry en invernadero bajo clima mediterráneo y concluyeron que un sombreado del 50 % ocasionó una reducción de la producción por debajo del umbral de rentabilidad. Por otra parte, el sombreado en invernaderos puede tener efectos positivos al dar lugar a reducciones en consumo de agua de riego. Lorenzo y col,

informaron que el sombreado móvil mejoró la calidad de los tomates y aumentó el rendimiento comercializable de los pepinos. Además, se redujo la transpiración de los cultivos y, por tanto, el consumo de agua, logrando una mejora significativa en la eficiencia del uso de agua (incrementos del 47 % y 62 % para los cultivos de tomate y pepino, respectivamente).

Comercialmente en el mercado se encuentran diversas propuestas de invernadero agrivoltaico. Los más sencillos utilizan colectores fijos sobre su estructura. La Figura 4 muestra invernaderos con seguidores solares tanto exteriores como interiores.

Un mayor nivel de tecnificación para control climático dentro de los recintos puede lograrse mediante el uso de seguidores. Estos pueden manejarse para controlar la radiación solar en momentos determinados del día o bien en determinados estadios fenológicos de los cultivos. La Figura 5(a) muestra el invernadero construido bajo el proyecto REGACE. En él los módulos fotovoltaicos sobre seguidores de un eje se han introducido dentro del invernadero entre el cultivo y la cubierta. Este concepto les permite utilizar los seguidores como elemento de control de la radiación solar. El hecho de que los seguidores se sitúen en el interior permite aligerar su estructura portante pues no se deben considerar las sobrecargas de viento (*REGACE Project - Using Co₂ for Green Energy*, 2023).

Figura 4. Diferentes tipologías de invernadero



Fuente: Kuo et al., 2023; *REGACE Project - Using Co₂ for Green Energy*, 2023.

2.1.2 Cimentaciones

En los proyectos de estructuras elevadas la cimentación supone un aspecto de gran importancia. En general se persigue evitar las cimentaciones de hormigón debido a la reducción de superficie cultivable asociada como por la dificultad de su retirada al finalizar el proyecto. Fabricantes como Solasol (*Estructuras Agrivoltaicas*, n.d.) y Sunfer (Sunfer, n.d.) ofrecen estructuras de pérgola prefabricadas para proyectos agrivoltaicos aplicables a diferentes cultivos basadas en perfiles hincados. Las cimentaciones basadas en perfiles hincados ofrecen rapidez de instalación, alta capacidad de carga, mínima alteración del suelo y posibilidad de reutilización,

convirtiéndolas en una solución eficiente, sostenible y económica para proyectos de infraestructura. Otras empresas, como Ecoresystems (ECORESYSTEMS, n.d.) o TRAMAT (Tramat S. L., 2022) ofrecen cimentaciones atornilladas, basadas en pilotes de tornillo. Este tipo de cimentación es de montaje rápido y fácil. Además ofrecen como ventajas: a) no requieren excavación; b) rápida instalación en campo; c) elevada estabilidad ante posibles desplazamientos del suelo; d) su impacto medioambiental es mínimo, y e) son fácilmente desmontables y reutilizables.

2.1.3 Costes asociados

Scharf y col. (Scharf *et al.*, 2021) realizaron un análisis detallado de los costes asociados a las tecnologías, desglosando por categorías y comparando: sistemas agrivoltaicos elevados, con paneles verticales y con seguidores solares, frente a instalaciones fotovoltaicas convencionales montadas en el suelo. Aunque las cifras del estudio se basan en datos reales, los autores señalan que deben interpretarse como aproximadas, ya que los costes pueden variar significativamente dependiendo de la ubicación geográfica (y las condiciones locales asociadas), la capacidad instalada, el tipo de sistema y la tecnología de los módulos fotovoltaicos empleados. En el caso específico de las instalaciones agrivoltaicas, los costes también están influenciados por la gestión agrícola asociada al cultivo, ya que esto puede requerir ajustes específicos en el diseño del sistema. Los resultados clave de este análisis se presentan resumidos en la Tabla 2, que muestra los valores económicos de referencia correspondientes al año 2021, expresados en €/kWp.

Tabla 2. Costes de inversión €/kWp de diferentes diseños de sistemas fotovoltaicos agrícolas en comparación con los sistemas montados en el suelo

	SISTEMA CONVENCIONAL (€/kWp)	SISTEMA VERTICAL (€/kWp)	ESTRUCTURA ELEVADA (€/kWp)	ESTRUCTURA ELEVADA CON SEGUIDOR SOLAR (€/kWp)
Módulos	220	252	360	360
Estructura	75	191	175	400
Proyecto	85	53	150	300
Conexión a red	94	94	94	94
Cableado	49	49	49	49
Inversor	31	31	31	31
Cerca perimetral	18	18	0	0
TOTAL	572	688	859	1.234

Fuente: Scharf *et al.*, 2021.

2.2. Desarrollos en colectores solares agrivoltaicos

En este epígrafe se tratan los módulos fotovoltaicos que cuidan algún aspecto de la radiación solar con el fin de mejorar las condiciones de su entorno favoreciendo las condiciones ambientales de los cultivos. Con este objeto han sido varias las alternativas tecnológicas que se han propuesto y que han llegado al mercado.

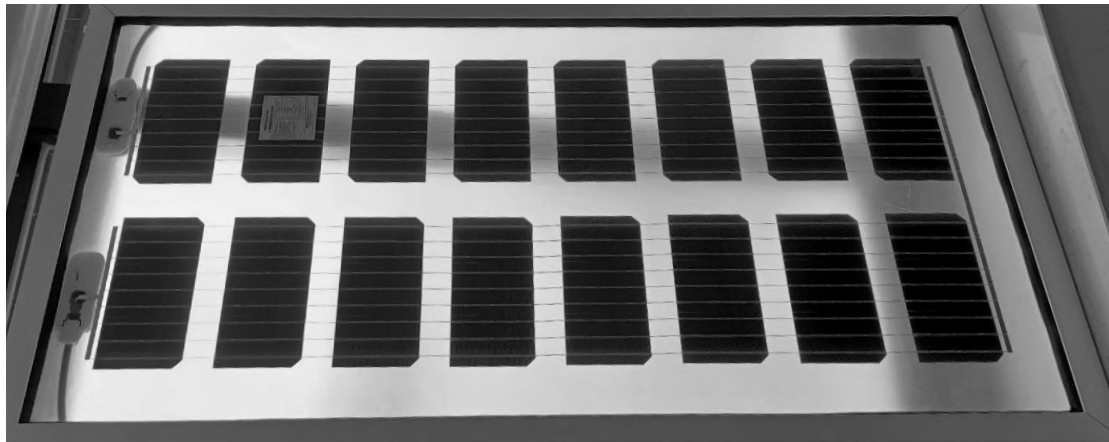
Destacan los módulos semitransparentes de silicio cristalino (Si-c) ya que esta opción se utiliza ampliamente en instalaciones como invernaderos y sistemas agrivoltaicos, además en aplicaciones urbanas, Gorjian y col. (Gorjian *et al.*, 2022). Esto se debe a ventajas, como el bajo coste, la estabilidad y la alta eficiencia de las células de silicio. Dado que las células de silicio son opacas, la semitransparencia se logra espaciando las células dentro del módulo y encapsulándolas en materiales transparentes, principalmente resina de metacrilato o vidrio (Figura 6). Estos colectores tienen un precio más elevado en comparación con los módulos opacos convencionales, sin embargo permiten una menor heterogeneidad en la distribución espacial de radiación solar sobre los cultivos. Así, a igualdad de condiciones radiativas en el cultivo, las estructuras portantes de módulos semitransparentes son más bajas, y, por tanto más económicas que las que usan módulos convencionales. En el campo comercial destaca el fabricante Eurener [22] con módulos de potencias comprendidas entre 260 W a 365 W, con células bifaciales embutidas entre vidrios templados y tamaños comprendidos entre 1.94 m² y 2.56 m².

El fabricante Bisol (BISOL Group, n.d.) recientemente ha lanzado una nueva línea de paneles solares transparentes para proyectos agrivoltaicos, en versiones de 320 W (BDO) y 410 W (BBO). Estas opciones, además de ser estéticas y rentables, ofrecen una ganancia bifacial de hasta el 40 % gracias a sus láminas traseras transparentes. El módulo de 320 W mide 1.722 mm × 1.134 mm, con una masa de 22 kg y tiene una eficiencia del 16,4 %, mientras que el de 410 W mide 2.094 mm × 1.134 mm, con masa de 26 kg alcanza una eficiencia del 17,3 %. Ambos operan entre -40 °C y 85 °C, tienen vidrio templado de alta transparencia y clasificación IP68. Algunos fabricantes como Mingj Enterprise Company (*Ming Company*, n.d.) se especializa en el ensamblaje de paneles solares con especificaciones estándar y especiales, bajo pedido para aplicaciones de sistemas solares concretas. En esta línea, la empresa alemana BayWa r.e. y su filial holandesa GroenLeven BV han mostrado otra opción como es la autofabricación de paneles solares monocristalinos específicos. Los han utilizado en estructuras elevadas dedicadas al cultivo de frutos rojos protegidos. Se trata de módulos de 260Wp con células embutidas, con diferentes niveles de transparencia, entre dos vidrios. Los nuevos sistemas se implementaron y probaron en cinco proyectos agrivoltaicos piloto en los Países Bajos con cinco tipos diferentes de cultivos: arándanos, grosellas rojas, frambuesas, fresas y moras. Además, los sistemas de montaje también se diseñaron específicamente para que la estructura portante de los módulos pudiese desempeñar funciones de radiación de calor cuando se producen excesos de temperatura.

Una tecnología diferente y prometedora la constituyen los módulos llamados DSSC (célula solar sensibilizada mediante pigmentación) que tienen varias ventajas: facilidad de fabricación con técnicas de impresión convencional, son semi-flexibles y semi-transparentes,

lo que les permite aplicaciones no viables en sistemas basados en vidrio, y utilizan materiales de bajo coste. Aunque su eficiencia de conversión es menor las DSSC siguen siendo una tecnología prometedora, especialmente para aplicaciones específicas donde el coste, la estética o el rendimiento bajo luz difusa son factores clave. En el plano comercial destaca la empresa GCell (G24 Power, n.d.).

Figura 5. Módulo fotovoltaico semitransparente para aplicaciones agrivoltaicas



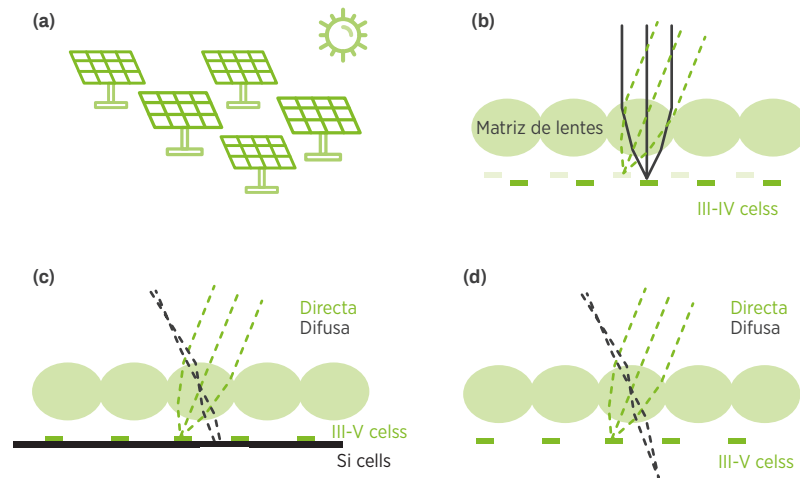
Soliculture (Soliculture, n.d.) comercializó el panel solar LUMO en 2012. Estos paneles transparentes integran una serie de tiras fotovoltaicas de silicio insertadas, con baja densidad superficial, en un panel de vidrio, lo que permite que la radiación pase entre las tiras. Una capa delgada de material luminescente se adhiere a la parte posterior del vidrio, mejorando el espectro de la radiación solar transmitida. El espectro de radiación transmitida se optimiza para mejorar la producción de energía y facilitar el desarrollo de las plantas. Los paneles solares LUMO son ideales para las áreas de producción de cultivos en invernaderos, donde se desea la máxima transmisión de luz. La tecnología central de LUMO se basa en un pigmento que absorbe las longitudes de onda correspondientes al verde y reemite esta energía en longitudes más largas, convirtiendo la luz verde en luz roja, ofreciendo la ventaja de que la luz roja es más eficientemente captada por los cloroplastos fotosintéticos. Los cultivos bajo LUMO han mostrado respuestas de crecimiento positivas, incluyendo mayores rendimientos, tiempos más rápidos de maduración y mayor resistencia a enfermedades.

La empresa suiza Insolight ha desarrollado un módulo solar de micro concentración fotovoltaica que incorpora un microseguimiento planar y una arquitectura híbrida con concentrador fotovoltaico y panel plano. Este diseño permite aplicaciones en tejados fijos y lo hace adecuado para ubicaciones con una alta proporción de luz difusa. Tras demostrar una eficiencia del 29 %, el consorcio HIPERION, desarrolló entre 2019 y 2023 un proyecto de ámbito europeo con objeto de industrializar esta tecnología.

Además, Insolight está desarrollando módulos translúcidos basados en una arquitectura similar de seguimiento planar, que permiten la transmisión de luz difusa y abren posibilidades para aplicaciones en el uso dual del suelo, como las agrivoltaicas.

En concreto, la tecnología THEIA (Translucency and High Efficiency in Agrivoltaics) implica el uso de una matriz densa de lentes que, a modo de pequeñas lupas, concentran la radiación solar directa en pequeñas células fotovoltaicas de alta eficiencia. De esta manera, estos colectores aprovechan la radiación solar directa para generación energética. Sin embargo la radiación difusa atravesará el módulo. La Figura 6 muestra el esquema de principio de estos colectores. Este tipo de módulos se han implementado en una instalación agrivoltaica piloto a gran escala en Valais, Suiza.

Figura 6.
Tecnología THEIA
desarrollada por Insolight
Fuente: Nardin et al., 2021.



Dentro de las tecnologías innovadoras destaca la tecnología fotovoltaica orgánica (OPV), que permite personalizar las propiedades espectrales de la absorción fotónica. Esto hace posible alcanzar una transparencia selectiva para ciertas longitudes de onda, logrando una alta transmisión de luz en el rango solar de 400 a 700 nm, que corresponde a las longitudes de onda esenciales para la fotosíntesis. En España, OnyxSolar ha desarrollado un diseño de invernadero experimental basado en módulos de esta tecnología. (*Onyx Solar, Soluciones de Fotovoltaica Integrada en Edificios*, n.d.) Comercialmente, la empresa franco-alemana ASCA (ASCA®, n.d.) produce y comercializa módulos OPV flexibles y personalizables, diseñados para diversas aplicaciones, incluyendo invernaderos. En España la empresa VITSOLC (*Vitsolc / ICFO*, n.d.) es una *spinoff*, surgida del ICFO (*Institut de Ciències Fotòniques* o *Instituto de Ciencias Fotónicas*), con el objeto de producir módulos fotovoltaicos transparentes con aplicación agrivoltaica. Se especializa en fabricar mini-módulos fotovoltaicos transparentes que puedan ser laminados en grandes paneles de ventanas fotovoltaicas transparentes.

Finalmente, la empresa alemana TubeSolar (TubeSolar AG, n.d.) ha desarrollado módulos fotovoltaicos tubulares basados en la producción de tubos fluorescentes de OSRAM/LEDVANCE. La principal ventaja es el sombreado homogéneo que proporciona junto con menores cargas de viento y menores costos en términos de la estructura de montaje (*The Future of Photovoltaics* - TubeSolar AG, n.d.).

2.3. Monitorización, Inteligencia Artificial y Software

En la actualidad son múltiples las empresas que enfocan sus esfuerzos a controlar el movimiento de los seguidores solares, el riego y la ventilación (en el caso de invernaderos) utilizando las medidas de los sistemas de monitorización. Dado que el control de las variables ambientales puede resultar complejo y que, en múltiples ocasiones la información disponible resulta incompleta, son múltiples los esfuerzos que se están dedicando a entrenar sistemas de Inteligencia Artificial. En este ámbito destacan empresas como Powerfultree o las PYMES Ingeniería y Desarrollos Renovables (INDEREN) (*SMART CLIMATE AGRI-PV* - INDEREN, n.d.), Plug and Play Energy, EMIN Energy Management Innovation, ETRA Investigación y Desarrollo, y el Clúster de Energía de la Comunidad Valenciana (CECV), están llevando a cabo el proyecto SMART CLIMATE AGRI-PV (*SMART CLIMATE AGRI-PV* - INDEREN, n.d.). Este proyecto se enfoca en la investigación y desarrollo de un sistema innovador que combina inteligencia artificial y teledetección mediante drones, con el objetivo de optimizar la producción de cultivos en sistemas agrivoltaicos de manera climáticamente inteligente.

Cada vez son más los sistemas de monitoreo que utilizan IA para controlar la inclinación de los paneles solares para proteger los cultivos. Este es el caso, por ejemplo, del sistema vinícola agrivoltaico que Sun'Agri instaló en Piolenc (región de Hérault, Francia). En él, la parte fotovoltaica se compone de 280 paneles fotovoltaicos (con capacidad de generación de 84 kW) dispuestos a 4,2 m de altura que se pueden mover en tiempo real mediante un algoritmo basado en IA encargado de determinar la inclinación óptima de los paneles de acuerdo con los requisitos de luz solar y necesidades hídricas de las viñas, el modelo de crecimiento del cultivo, el tipo de suelo y las condiciones climáticas (Sun'Agri, n.d.).

3. Indicadores de Viabilidad de Instalaciones Agrivoltaicas

Para la evaluación del proyecto agrivoltaico se recomienda el uso de indicadores de desempeño (*Key Performance Indexes*, KPI). En este ámbito, autores como Willockx y col. (Cappelle *et al.*, 2020) distinguen cualitativos y cuantitativos. para evaluar los sistemas agrivoltaicos. Concretamente, como indicadores cualitativos propone:

- **Calidad de la producción agrícola:** este índice debe considerar cómo las condiciones climáticas generadas por la mayor sombra, menor temperatura y necesidades hídricas de los cultivos afectarán la calidad de los cultivos. Así, recientemente, ha constatado que en la cosecha de vid, en condiciones agrivoltaicas, disminuye el nivel de alcohol del vino hasta un 1,5 %, manteniendo la acidez, lo que resulta particularmente favorable en vinos blancos. También se observa una mejora en el perfil aromático, atribuida a un incremento del 13 % en los antocianos (pigmentos que influyen en el color) y un aumento en la acidez que varía entre un 9 % y un 14 %. Este hecho ha sido señalado como una posibilidad de resiliencia de este cultivo ante un panorama de cambio climático.
- **Confort en las condiciones de trabajo:** investigadores como Willockx señalan el suavizado de las condiciones climáticas derivadas de la sombra y menor demanda evapotranspirativa, como una mejora relativa en el ambiente laboral de agricultores en la instalación agrivoltaica respecto de las condiciones de cultivos tradicionales. Como variable asociada para cuantificar este efecto, los autores proponen registrar la temperatura de globo (Wet-Bulb Globe Temperature, WBGT) como indicadores de la sensación térmica. Por el contrario, autores como, Pascaris *et al.* (Pascaris *et al.*, 2021) señalan el riesgo de convivencia de los trabajadores agrícolas con elementos eléctricos activos, lo que implica la adopción de medidas formativas como de prevención de riesgos ante accidentes eléctricos.

Dentro de los indicadores cuantitativos, destacan:

- **Rendimiento energético:** aunque normalmente la producción energética se refiere a la unidad de superficie mediante el rendimiento energético (kWh/ha año), que se define como la energía eléctrica producida anualmente por unidad de terreno (normalmente medida en ha), también será habitual utilizar como referencia la potencia instalada. En este caso se define como la energía producida anualmente por cada unidad de potencia instalada (kWh/kWp año). El modelado del comportamiento de los sistemas fotovoltaicos es conocido y se encuentra implementada en programas como PVGIS (*JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*, n.d.) o SAM (National Renewable Energy Laboratory [NREL], n.d.) lo que permite que estos índices puedan estimarse con facilidad. A título de ejemplo, la normativa italiana no admite que este indicador baje en las instalaciones agrivoltaicas más del 60 % de su máximo técnicamente alcanzable.
- **Rendimiento agrícola:** el rendimiento agrícola representa la cantidad total de producción agrícola con respecto a la superficie del terreno. La mayor parte de las regulaciones agrivoltaicas muestran un gran interés en este indicador. Puede ser el peso específico en (kg/ha) por ejemplo de la producción final o de la materia seca de los cultivos en agrivoltaica. Este indicador resulta fundamental en normativas en aras a poder justificar el mantenimiento de la actividad agrícola como fundamental. Así en Italia se admite que la agrivoltaica conlleve un decaimiento de este índice de hasta el

30 % respecto del de las zonas testigo, mientras que en Alemania la norma DIN SPEC 91434 establece como valor mínimo admisible el 66 % del rendimiento de referencia.

- **Land Equivalent Ratio (LER):** Se trata de un índice técnico de productividad relativa del terreno que permite cuantificar la productividad sinérgica frente a la productividad de actividades separadas. Si consideramos dos actividades productivas coexistentes, en este caso producción agrícola y eléctrica, caracterizadas por los correspondientes rendimientos de producción agrícola (kg/ha año) y de producción eléctrica (kWh/ha año), el índice LER vendrá expresado por la ecuación 1, siendo (kg/ha año) la productividad del cultivo y (kWh/ha año) la eléctrica cuando ambas actividades se realizan por separado.

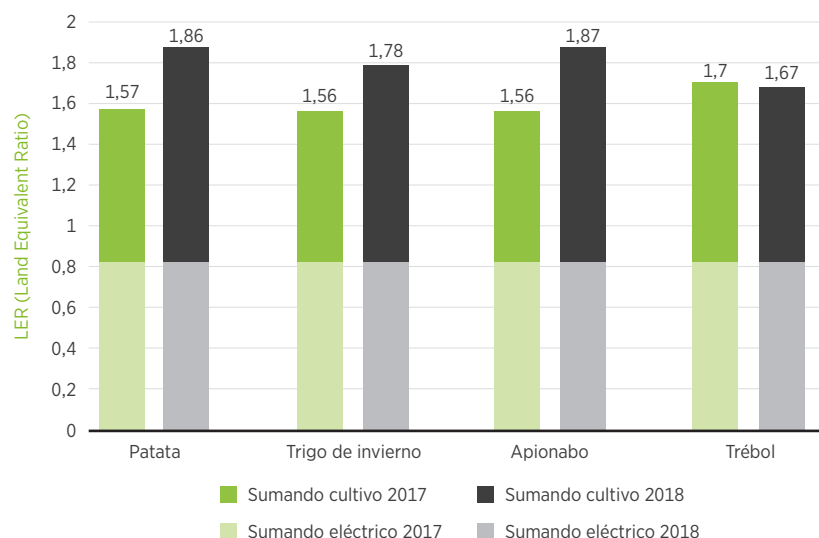
$$LER = \frac{Y_{cul_APV}}{Y_{cul_mono}} + \frac{Y_{ele_APV}}{Y_{ele_mono}} \quad (1)$$

El valor de LER superior a 1 implica una sinergia técnica de actividades sin que ello implique una sinergia económica, la cual deberá tener en cuenta costes y beneficios económicos de la actividad conjunta.

A título de ejemplo, en la Figura 7 se representan gráficamente los valores de LER registrados en la instalación agrivoltaica de Heggelbach, ubicada en Alemania, durante los años 2017 y 2018 (Trommsdorff *et al.*, 2021).

Figura 7.
Valores experimentales de LER determinados en Heggelbach (Alemania) en 2017 y 2018

Fuente: Trommsdorff *et al.*, 2021.



- **Ground Cover Ratio (GCR):** este índice permite cuantificar la intensidad del uso fotovoltaico del terreno y se define como el ratio de superficie de los colectores fotovoltaicos frente al área del terreno de la instalación agrivoltaica (Ecuación 2).

$$GCR = \frac{A_{\text{modulos PV}}}{A_{\text{APV}}} \quad (2)$$

Este índice se encuentra íntimamente relacionado con el grado de sombreamiento del cultivo así como con la radiación solar incidente en los cultivos. Así, en general, cabe esperar un crecimiento en el rendimiento energético y un decrecimiento tanto en la actividad fotosintética como en la actividad respiratoria de cultivos de las instalaciones conforme crece el GCR. Ahorro de agua: La reconocida influencia de la radiación solar y la temperatura ambiente en las necesidades hídricas de los cultivos hace que bajo condiciones agrivoltaicas las plantas necesiten menor cantidad de agua para su metabolismo. En la literatura se reconocen tasas de reducción de necesidades hídricas de 10 % y 20 % respecto al cultivo descubierto.

Además del ahorro mencionado en diferentes instalaciones agrivoltaicas se puede conseguir una mejora del régimen hídrico pues permiten recoger y almacenar el agua de lluvia (Emiliano Bellini, 2020).

Finalmente, entre los indicadores económicos cabe destacar:

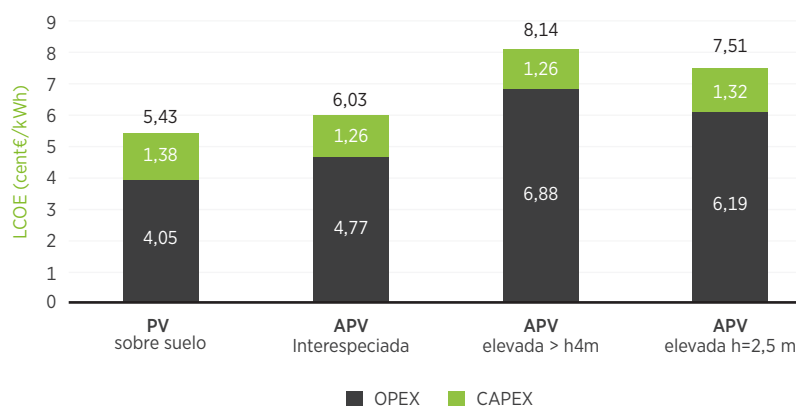
- **Levelized Cost of Energy (LCOE):** También conocido como Coste Nivelado de la Energía, se trata de indicador clave para estimar la rentabilidad de una instalación de generación energética. Se puede entender como el coste actualizado al momento inicial del proyecto dividido entre la energía total generada en la vida del proyecto. El coste actualizado debe contemplar los conceptos de Inversión inicial (CAPEX), Costes operación y mantenimiento (OPEX), Costes financieros y desmantelamiento. Así, LCOE es el valor que el promotor comparará con el precio de la energía en el mercado, consciente de que el proyecto será rentable si LCOE es inferior al precio de mercado.. La ecuación (4) establece el valor de LCOE en función del coste de inversión (CAPEX), los gastos de operación y mantenimiento (OPEX), el valor residual de la instalación R_n tras la vida útil, es decir, en el año n . En la ecuación (4) M_t representa la energía generada en cada año t e i la tasa de actualización considerada para la inversión.

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX_t}{(1+i)^t} - R_n}{\sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+i)^t}} \quad (4)$$

Los cálculos realizados y publicados para este índice por el Fraunhofer Institute (2022) indican que los LCOE de producción de electricidad en sistemas agrivoltaicos con cultivos herbáceos durante un período de 20 años considerando costes medios es de 8,15 céntimos €/kWh, resultando que son alrededor de un 50 % más altos que los de un sistema fotovoltaico medio montado en suelo. Sin embargo, en promedio, los sistemas agrivoltaicos son más rentables que los sistemas de fotovoltaica autónomos sobre tejado. Por otro lado, para instalaciones agrivoltaicas con pastos permanentes, los costos de generación de electricidad ascienden a 6,03 céntimos €/kWh en promedio, solo un poco más elevados que los de un sistema fotovoltaico convencional en suelo. La Figura 8 muestra el rango de costos de generación de electricidad (desglosados en coste de capital y de operación) de los sistemas agrivoltaicos en comparación con los sistemas fotovoltaicos convencionales.

Figura 8.
Estudio comparativo
de costes de generación
LCOE en sistemas
agrivoltaicos

Fuente: Fraunhofer Institute, 2022.



- **Valor Actual Neto (VAN):** También conocido como Net Present Value (NPV), se trata de un indicador que cuantifica todos los flujos de caja actualizados al momento inicial de la inversión evaluando en unidades monetarias la rentabilidad de un proyecto económico. La Ecuación (5) permite el cálculo de VAN siendo B_t el beneficio anual del proyecto en el año t .

$$VAN = -CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - R_n \quad (5)$$

Así, un VAN positivo significa que el proyecto globalmente generará beneficios.

- **Tasa Interna de Rendimiento (TIR):** es también un indicador financiero que mide la rentabilidad de una inversión o proyecto. La TIR equivale a la tasa de descuento que anula el Valor Actual Neto (VAN). En otras palabras, esta tasa representa el valor máximo admisible de la tasa de descuento con condiciones de rentabilidad del proyecto. El proyecto resultará más atractivo para un inversor con forme mayor sea este valor. Puede considerarse como el límite de tasa máxima de actualización del capital que hace rentable el proyecto.

4. Agrivoltaica y sociedad

4.1. Aceptación social de los promotores

Según los modelos desarrollados por Ketzer y col. (Ketzer *et al.*, 2020), existen relaciones causales entre los agentes implicados en las instalaciones agrivoltaicas, siendo estas relaciones caracterizables y representables en diagramas. Este autor establece que el nivel de aceptación de estas instalaciones depende del tamaño y la agrupación de las plantas, así como de diversos factores, tanto directos como indirectos. El interés de los agricultores en la agrivoltaica se basa en un conjunto de criterios que integran aspectos económicos y agrícolas (como la rentabilidad o las condiciones de cultivo) con elementos sociales y legales (como el conocimiento local). Aunque la participación de inversores externos puede resultar atractiva para los agricultores, este factor suele ser percibido como negativo por parte del público general, por lo que su implicación debería estar regulada dentro de marcos legales específicos.

El análisis señala que los agricultores de grandes explotaciones podrían mostrar poco interés en la agrivoltaica, a pesar de que esta, junto con las iniciativas cooperativas, es una opción preferida por los ciudadanos. Ketzer *et al.* (Ketzer *et al.*, 2020) también destacan la importancia de que los municipios establezcan planes de desarrollo que consideren la participación de la ciudadanía local y los criterios específicos del sitio para crear un marco de planificación. Este enfoque podría fomentar el incremento de instalaciones agrivoltaicas, tanto de manera directa como indirecta. Sin embargo, según este estudio, el crecimiento de las agrivoltaicas se verá limitado en el largo plazo ya que paulatinamente disminuirá la aceptación pública debido a la percepción de que estas instalaciones reducen el atractivo turístico, paisajístico y recreativo de las zonas donde se ubican.

4.2. Modelos de negocio

A pesar de los elevados costos iniciales de las instalaciones, el estudio de Trommsdorff y col. realizado en Alemania (Trommsdorff *et al.*, 2022) indica que la agrivoltaica puede ser una actividad económicamente rentable. Para lograrlo, la inversión debe estar alineada con el valor de las cosechas de modo que se alcance un modelo equilibrado cuando los ingresos provenientes de la venta de energía superan sistemáticamente a los agrícolas. Factores diferenciadores de estas instalaciones tales como un precio de venta de energía superior al de instalaciones fotovoltaicas convencionales y/o acuerdos favorables con comercializadoras de energía pueden contribuir a una rentabilidad sostenible.

El estudio mencionado destaca cómo los contratos que vinculan a los agentes explotadores en plantas agrivoltaicas son más complejos que los de instalaciones fotovoltaicas convencionales debido a su enfoque intersectorial, implicando funciones como la provisión y manejo

de la tierra, la inversión en sistemas agrivoltaicos y la operación del sistema fotovoltaico. En pequeños sistemas, estas funciones pueden ser asumidas por los agricultores, lo que facilita la planificación y contratación, además de permitir una gestión dinámica y descentralizada. Sin embargo, en proyectos más grandes, es común la incorporación de inversores externos, lo que puede dificultar el equilibrio de beneficios entre las actividades agrícolas y fotovoltaicas. La propiedad parcial por parte de los agricultores podría fomentar el uso dual, aunque introduce retos en la gestión financiera. En cuanto a la financiación, los autores mencionan opciones como préstamos bancarios, crowdfunding y arrendamientos financieros, pero no existen suficientes estudios que determinen cuáles son las más adecuadas. Por lo tanto, será necesario investigar más sobre modelos financieros específicos a medida que este sector continúe desarrollándose, considerando que estas estructuras dependerán de los contratos de explotación establecidos entre las partes interesadas.

4.3. Marco legal en Europa

En 2022, en la Unión Europea (UE) se contaban 41 GW (gigavatios) de potencia instalada. En ese momento se fijó como objetivo el crecimiento fotovoltaico hasta 750 GW. Este ambiciosa meta reconoce el papel estratégico de la energía fotovoltaica en los objetivos de seguridad, económicos y climáticos de. Con este escenario cabe esperar que la tecnología agrivoltaica adquiera una relevancia significativa. Sin embargo, en la actualidad el estado de desarrollo de esta tecnología en los diferentes países de la Unión es muy dispar.

4.3.1 Alemania

Alemania tiene como objetivo aumentar la capacidad de energía solar fotovoltaica instalada de 60 a 215 GWp. La norma DIN SPEC 91434 (*Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an Die Landwirtschaftliche Hauptnutzung*, 2021), publicada en 2021, define y caracteriza las tipologías de instalaciones agrivoltaicas a considerar en el país. La Ley de Energías Renovables EEG 2023 (*Gesetz Für Den Ausbau Erneuerbarer Energien- ErneuerbareEnergien-Gesetz - EEG 2023*), garantiza acceso prioritario a la red y tarifas reguladas. En particular, el artículo 48 establece una retribución de 0,07 €/kWh para distintos tipos de instalaciones fotovoltaicas y considera la viabilidad de proyectos agrivoltaicos en terrenos como:

- a) Tierras cultivables que no sean turberas ni áreas designadas como reservas naturales o parques nacionales bajo la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza.
- b) Pastizales agrícolas que se mantengan en uso como tales, siempre que no estén en páramos, áreas protegidas de conservación natural, zonas Natura 2000, ni hábitats listados en el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE.

El gobierno también permite que los terrenos agrícolas empleados para la agrivoltaica sigan siendo elegibles para recibir hasta el 85 % de las ayudas estándar (pagos directos) otorgadas en el marco de la Política Agrícola Común (PAC) de la UE, siempre que al menos el 85 % de la superficie siga siendo apta para el cultivo.

Además, en las explotaciones agrícolas se permite la instalación de dos sistemas fotovoltaicos independientes: uno destinado al autoconsumo doméstico y otro para el sistema agrivoltaico.

4.3.2 Francia

En abril de 2024 se publicó el Decreto n.º 2024-318, relativo al «desarrollo de la agrivoltaica y a las condiciones de instalación de sistemas fotovoltaicos en terrenos agrícolas, naturales o forestales» (*Décret N° 2024-318; Relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers*, 2024). Este decreto, esperado desde la entrada en vigor del artículo 54 de la ley n.º 2023-175 del 10 de marzo de 2023 (*LOI N° 2023-175, Relative à l'accélération de La Production d'énergies Renouvelables*, 2023) sobre la aceleración de la producción de energías renovables (*Accélération de la Production d'Energies Renouvelables, APER*), define y establece las condiciones para la implementación de los nuevos proyectos agrivoltaicos y sistemas fotovoltaicos en terrenos naturales, agrícolas y forestales. El cuerpo del decreto está conformado por una amplia modificación de legislación específica (Código de Energía, Código de planificación urbana), sin embargo, el marco normativo sigue incompleto pues aún faltan disposiciones legislativas (Vg: Contratos y reparto de valor entre agentes) así como reglamentaciones específicas.

Hasta este momento, existen convocatorias competitivas para proyectos innovadores que la Comisión Reguladora de la Energía (CRE) barema semestralmente desde 2021. Los proyectos se priorizan en función del precio de la energía ofertada, indicadores ambientales y de financiación. Anualmente, tras la construcción, los promotores están obligados a presentar informes de seguimiento donde se muestra el rendimiento agrícola obtenido.

4.3.3 Italia

En mayo de 2024 el Gobierno italiano aprobó un Decreto-Ley que prohibió la instalación de nuevos sistemas fotovoltaicos en el suelo y limitó la expansión de los ya existentes en terrenos clasificados como agrícolas. Esta normativa incluye medidas urgentes relacionadas con la agricultura, la pesca y empresas consideradas estratégicas para el país. En lo fotovoltaico, el objetivo es garantizar que la producción de energía sea compatible con el uso agrícola de la tierra cuya vocación se destina principalmente a la producción alimentaria. En febrero de 2024 (*Decreto Ministro 436*, 2023), (*Decreto Dipartamentali 233*, 2024) entró en vigor el decreto n.º 436 del Ministro de Medio Ambiente y Seguridad Energética en el que se definen

los criterios y métodos para asignación de ayudas a las instalaciones agrivoltaicas. La finalidad de esta iniciativa es fomentar las inversiones en la creación de sistemas agrivoltaicos y en la implementación de herramientas de medición para supervisar las actividades agrícolas asociadas. Esto permitirá analizar factores como el microclima, la eficiencia en el uso del agua, la regeneración de la fertilidad del suelo, la resistencia frente al cambio climático y la productividad agrícola en distintos tipos de cultivos. Con un presupuesto de 1.100 Millones de euros se pretende incrementar la potencia en 900 MW la potencia de los paneles solares fotovoltaicos en sistemas agrivoltaicos. También se persigue promover soluciones innovadoras, con módulos de alta eficiencia, con el fin de compatibilizar la generación de energía con las actividades agrícolas, generando beneficios competitivos, mejorando la rentabilidad, la promoción y recuperación de tierras.

4.3.4 España

A diferencia de los países descritos, donde existe una amplia documentación de carácter oficial en la que se ha definido y caracterizado el término agrivoltaica, en España sólo se ha utilizado una breve descripción aparecida en la Orden TED/765/2024, de 22 de julio, por la que se establecen las bases reguladoras para la concesión de ayudas a la inversión en proyectos innovadores de energías renovables y almacenamiento (Orden TED/765/2024, de 22 de Julio, por la que se establecen las bases reguladoras para la concesión de ayudas a la inversión en proyectos innovadores de Energías Renovables y Almacenamiento, así como a la implantación de Sistemas Térmicos Renovables. Pro, 2015). En esta orden se establecen las bases reguladoras para la baremación y concesión de ayudas a proyectos de producción de energía eléctrica de carácter innovador (también se incluyen proyectos que proponen bombas de calor con energías renovables). En su programa 1, la orden sólo admite instalaciones agrivoltaicas con almacenamiento energético.

La orden considera agrivoltaicos «aquellos proyectos en los que se realice, sobre la misma superficie de terreno originalmente destinado a uso agrícola, un uso combinado para la producción agrícola y la generación de energía fotovoltaica, siempre que se priorice el uso agrícola como uso principal, y la producción de energía tenga un fin secundario. No se considera agrivoltaica a efectos de esta orden, la concentración de paneles solares sin cultivo en una parte de la parcela y el uso exclusivamente agrícola del resto, aunque se cumplan globalmente los requisitos técnicos exigidos para este programa.» La orden distingue, en función de cómo quede situada la estructura portante de los módulos respecto del cultivo, tres tipos de instalaciones:

- Agrivoltaica intercalada con el cultivo. En este tipo se incluyen las instalaciones cuyas estructuras portantes impiden la utilización para cultivo de la superficie por debajo de los colectores fotovoltaicos. La superficie cultivable, por tanto, queda reducida a los espacios o calles que separan estructuras contiguas.
- Agrivoltaica con estructura sobre el cultivo.

- En este tipo tanto la estructura como la altura de los módulos debe permitir el cultivo y tránsito de personas en el terreno, por lo que se establece una altura libre mínima de 2 metros.
- Agrivoltaica con estructura sobre el cultivo $h > 4$ m.

En este tipo los módulos fotovoltaicos se elevan cuatro metros, como mínimo respecto del terreno cultivable. La altura debe ser compatible con el cultivo y sus necesidades de mecanización.

En los casos de estructuras elevadas se considera como altura la mínima distancia entre el terreno agrícola y el borde inferior de los colectores fotovoltaicos ya instalados. Si se trata de una instalación con seguidores a un eje, donde los colectores son móviles, se considera la altura del eje de giro respecto del suelo. Si los seguidores son de dos ejes se considera la altura del centro del eje de giro.

Como restricciones se imponen:

- La potencia de las instalaciones subvencionables debe ser superior a 200 kWp. Los proyectos de menor potencia deben presentarse agregados siempre que individualmente superen la potencia de 15 kWp y el total de la agregación supere el umbral de 200 kWp. Todas las instalaciones deben responder a una de las tres tipologías descritas y cumplir independientemente cada una de ellas con los requisitos técnicos exigidos en la orden. Además, en este caso, las solicitudes las debe presentar un único beneficiario o agrupación.
- Se admite que la instalación fotovoltaica sea aislada, de autoconsumo o conectada a red. En todo caso la potencia nominal de colectores debe superar la potencia de inversores. Además se debe disponer de un sistema de almacenamiento, cuyo ratio supere el umbral de 0,5 kWh/kWp, y que también es subvencionable, aunque no la parte de almacenamiento que hiciese superar el ratio en más de 5 kWh/kWp.
- En la proyección en planta de la instalación fotovoltaica la superficie fotovoltaica opaca deberá ser inferior al 40 % de la superficie total diseñada para el proyecto agrivoltaico. Esta limitación se flexibiliza para las instalaciones con estructura elevada que utilicen colectores solares con un grado de transparencia superior al 25 %. En este caso se admite un grado de cobertura del 80 %. Para instalaciones con seguidores el grado de cobertura de la superficie se determina considerando la posición horizontal de los colectores fotovoltaicos.

En ningún caso la pérdida de superficie cultivable debida a las estructuras debe superar el 10 % de la superficie total del proyecto agrivoltaico. Además, el proyecto debe asegurar que las labores agrícolas previstas se puedan realizar adecuadamente. En los casos en que el promotor del proyecto no lleve a cabo la actividad agrícola, deberá aportarse documento de compromiso entre el promotor y agricultor por el que se asegure el uso agrícola de la tierra compatible con la producción energética.

5. Perspectivas de futuro en España

En contraste con los países de nuestro entorno, en España el sector agrivoltaico es prácticamente inexistente. Aunque son múltiples las instalaciones de carácter experimental promovidas por centros de investigación (IMIDA, IRTA, CTAEX, etc.), Universidades (como las de Jaén, Cartagena, Castilla la Mancha, Sevilla o Córdoba) o incluso compañías energéticas, se constata que el número de explotaciones agrivoltaicas comerciales es inferior a cinco. Tampoco existe un tejido empresarial, como el sucintamente descrito en el epígrafe 2, que oferte soluciones tecnológicas para agrivoltaicas acordes a nuestras condiciones de cultivo.

Ante esta situación los ministerios de Agricultura, Pesca y Alimentación y el de Transición Ecológica y Reto Demográfico, a través de IDAE, han venido colaborando desde 2022 para ir creando tanto un marco normativo y líneas de ayudas para el sector. Como consecuencia, en julio de 2024 se publicó la primera convocatoria (Orden TED/765/2024, de 22 de Julio, por la que se establecen las bases reguladoras para la concesión de ayudas a la inversión en proyectos innovadores de Energías Renovables y Almacenamiento, así como a la implantación de Sistemas Térmicos Renovables. Pro, 2015) de ayudas a instalaciones agrivoltaicas con almacenamiento. Siendo, en orden de magnitud, 75 los proyectos presentados, cabe esperar que la mayor parte de los mismos sean subvencionados y puestos en funcionamiento antes de marzo de 2026. Así, cabe esperar que 2025 suponga un punto de inflexión en el desarrollo de la agrivoltaica en nuestro país. Cabe esperar que estas nuevas instalaciones permitirán ir creando bases de datos de indicadores, como los descritos en el epígrafe 3, sobre las que las técnicas de Benchmarking permitan establecer pautas de aprendizaje y mejora. No obstante, las administraciones aún tendrán que resolver los problemas de acceso y evacuación eléctrica a redes de las nuevas instalaciones o el establecimiento de normas de compatibilización agrícola con las de las ayudas de la PAC.

Referencias bibliográficas

- Aroca-Delgado, R.; Pérez-Alonso, J.; Callejón-Ferre, Á. J.; Velázquez-Martí, B. (2018): «Compatibility between crops and solar panels: An overview from shading systems»; en *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 10, Issue 3). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su10030743>
- ASCA (n.d.): *Redefining Photovoltaics*. Disponible en: <https://www.asca.com/>
- BISOL Group (n.d.): *BISOL Lumina PV modules*. Disponible en: www.bisol.com
- Cappelle, J.; Herteleer, B.; Ronsijn, B.; Uytterhaegen, B.; Willockx, B. (2020): «A Standardized Classification and Performance Indicators of Agrivoltaic Systems»; en *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 252, 1995–1998. Disponible en: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47>
- Cossu, M.; Ledda, L.; Urracci, G.; Sirigu, A.; Cossu, A.; Murgia, L.; Pazzona, A.; & Yano, A. (2017): «An algorithm for the calculation of the light distribution in photovoltaic greenhouses»; en *Solar Energy*, 141, 38–48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.024>
- Décret N° 2024-318 Relatif au développement de l'agrivoltaïsme et aux conditions d'implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers (2024): Disponible en: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000049386027/>
- Decreti Ministro 436 (2023): Disponible en: <https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNRR/dec.436-2023.pdf>
- Decreto Dipartamentali 233 (2024): Disponible en: [https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNRR/m_amte.MASE.DIE%20REGISTRO%20DECRETI\(R\).0000251.31-05-2024.pdf](https://www.mase.gov.it/sites/default/files/PNRR/m_amte.MASE.DIE%20REGISTRO%20DECRETI(R).0000251.31-05-2024.pdf)
- DIN (2021): *Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an Die Landwirtschaftliche Hauptnutzung*. Disponible en: <https://www.dinmedia.de/en/technical-rule/din-spec-91434/337886742>
- Dupraz, C.; Marrou, H.; Talbot, G.; Dufour, L.; Nogier, A.; Ferard, Y. (2011): «Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes»; en *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- ECORESYSTEMS. (n.d.): *Proyectos realizados con tornillos Krinner*. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15076011>
- Emiliano Bellini (2020): Special solar panels for agrivoltaics; en *PV Magazine*. Disponible en: <https://www.pv-magazine.com/2020/07/23/special-solar-panels-for-agrivoltaics/>
- Fraunhofer Institute (2022): *Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition*.
- G24 Power (n.d.): *Dye Sensitized Solar Cells*. Disponible en: <https://gcell.com/>
- Gesetze (2023): *Gesetz Für Den Ausbau Erneuerbarer Energien (Erneuerbare Energien-Gesetz - EEG 2023)*. Disponible en: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf

- Goetzberger, A.; Zastrow, A. (1981): «On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation»: en *International Journal of Solar Energy*, 55–69. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Gorjian, S.; Bousi, E.; Özdemir, Ö. E.; Trommsdorff, M.; Kumar, N. M.; Anand, A.; Kant, K.; Chopra, S. S. (2022): «Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology»; en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112126. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112126>
- JRC (2023): *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission*. Disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- Ketzer, D.; Schlyter, P.; Weinberger, N.; Rösch, C. (2020): «Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology – A system dynamics analysis»; en *Journal of Environmental Management*, 270, 110864. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110864>
- Kittas, C.; Katsoulas, N.; Rigakis, N.; Bartzanas, T.; Kitta, E. (2012): «Effects on microclimate, crop production and quality of a tomato crop grown under shade nets»; en *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 87(1), 7–12. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14620316.2012.11512822>
- Kuo, C. F. J. ; Su, T. L. ; Huang, C. Y. ; Liu, H.C. ; Fulginei, F. R.; Kuo, C. F. J.; Su, T. L.; Huang, C. Y.; Liu, H. C.; Barman, J.; Kar, I. (2023): *Citation: Design and Development of a Symbiotic Agrivoltaic System for the Coexistence of Sustainable Solar Electricity Generation and Agriculture*. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15076011>
- LOI N° 2023-175 Du 10 Mars 2023, *Relative à l'accélération de La Production d'énergies Renouvelables* (2023): Disponible en: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORF-TEXT000047294244/>
- López-Díaz, G.; Carreño-Ortega, A.; Fatnassi, H.; Poncet, C.; Díaz-Pérez, M. (2020): «The Effect of Different Levels of Shading in a Photovoltaic Greenhouse with a North–South Orientation»; en *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 882, 10(3), 882. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/APP10030882>
- MetalFrame Renovables (n.d.): Disponible en: <https://www.mfrenovables.com/es/>
- Nardin, G.; Domínguez, C.; Aguilar, Á. F.; Anglade, L.; Duchemin, M.; Schuppisser, D.; Gerlich, F.; Ackermann, M.; Coulot, L.; Cuénod, B.; Petri, D.; Niquille, X.; Badel, N.; Lachowicz, A.; Despeisse, M.; Levrat, J.; Ballif, C.; Askins, S.; Núñez, R.; Antón, I. (2021): «Industrialization of hybrid Si/III–V and translucent planar micro-tracking modules»; en *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 29(7), 819–834. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/PIP.3387>

- National Renewable Energy Laboratory (2023): *System Advisor Model (SAM)*. Disponible en: <https://sam.nrel.gov/>
- Next2Sun (2025): *Testimonials Agri-PV Plants*. Disponible en: <https://next2sun.com/en/testimonials/agripv-systems/>
- Ombrea (2024): *L'excellence de l'agrivoltaïsme au service des cultures*. Disponible en: <https://www.ombrea.fr/>
- Onyx Solar (2025): *Soluciones de Fotovoltaica Integrada en Edificios*. Disponible en: <https://onyxsolar.es/>
- Orden TED/765/2024, de 22 de Julio, Por La Que Se Establecen Las Bases Reguladoras Para La Concesión de Ayudas a La Inversión En Proyectos Innovadores de Energías Renovables y Almacenamiento, Así Como a La Implantación de Sistemas Térmicos Renovables (Pro, Boletín Oficial del Estado 26798 (2015).
- Oscar Aceves, CTO & CEO (2025): Vitolsolc, ICFO. Disponible en: <https://www.icfo.eu/innovation/spin-offs/meet-spin-offs/vitsolc/>
- Pascaris, A. S.; Schelly, C.; Burnham, L.; Pearce, J. M. (2021): «Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics»; en *Energy Research & Social Science*, 75, 102023. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102023>
- REGACE Project - Using Co₂ for Green Energy (2023): Disponible en: <https://regaceproject.com/>
- Scharf, J.; Grieb, M.; Fritz, M. (2021): *Agri-Photovoltaik Stand und offene Fragen*. Disponible en: https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/tfz_bericht_73_agri-pv.pdf
- SMART CLIMATE AGRI-PV - INDEREN. (n.d.): Retrieved March 30, 2023. Disponible en: <https://inderen.es/es/smart-climate-agri-pv-inteligencia-artificial-teledeteccion-drones-soluciones-agrovoltaicas/>
- SOLASOL (n.d.): *Estructuras Agrivoltaicas*. Disponible en: <https://solasolenergy.com/agrovoltaica/>
- Soliculture. (n.d.): *Lumo greenhouse improve your power, produce & profits*. Disponible en: <http://www.soliculture.com/>
- Sun'Agri. (n.d.): *Sun'Agri Project*. Retrieved March 22, 2023. Disponible en: <https://sunagri.fr/>
- Sunfer (n.d.): *Agrovoltaica*. Disponible en: <https://sunferenergy.com/agrovoltaica/>
- SunSupport. (n.d.): *No Title*.
- The Future of Photovoltaics - TubeSolar AG (2023): Retrieved March 30, 2023. Disponible en: <https://tubesolar.de/en/the-future-of-photovoltaics/>

- Tramat S.L. (2022): *Cimentación atornillada*. Disponible en: <https://tramat.net/cimentacion-atornillada/>
- Trommsdorff, M.; Dhal, I. S.; Özdemir, Ö. E.; Ketzer, D.; Weinberger, N.; Rösch, C. (2022): «Agri-voltaics: Solar power generation and food production»; en *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89866-9.00012-2>
- Trommsdorff, M.; Kang, J.; Reise, C.; Schindele, S.; Bopp, G.; Ehmann, A.; Weselek, A.; Högy, P.; Obergfell, T. (2021): «Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany»; en *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- TubeSolar AG (2025): *The Future of Photovoltaics*. Disponible en: <https://tubesolar.de/en/the-future-of-photovoltaics/>
- WSP (2025): *Paneles fotovoltaicos en invernaderos «el coronil»*. Disponible en: <https://www.wsp.com/es-es/proyectos/el-coronil-solar-agro-energy-greenhouses>