



INFORME 2023
PROSPECTIVO
SOBRE LA SITUACIÓN
DE LA **ENERGÍA**
AGRIVOLTAICA



**FÍSICA PARA LAS
ENERGÍAS RENOVABLES**
GRUPO DE INVESTIGACIÓN TEP-215



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, PESCA
Y ALIMENTACIÓN



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

Título:

Informe prospectivo sobre situación de la energía agrivoltaica.

Edita:

© Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones.

Coordinación:

Subdirección de Cultivos Herbáceos e Industriales y Aceite de Oliva.
Dirección General de Producciones y Mercados Agrarios.

Realización:

Departamento de Física para las Energías Renovables. Grupo de Investigación TEP-215 (Universidad de Córdoba).

Diseño y maquetación:

Centro de Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

NIPO línea: 003-24-096-1

Distribución y venta:

Paseo de la Infanta Isabel,1
28014 Madrid
Teléfono: 91 347 55 41

Tienda virtual:

www.mapa.gob.es
<https://servicio.mapama.gob.es/tienda/>

e-mail:

centropublicaciones@mapa.es

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es/>

Las opiniones expresadas en esta obra corresponden exclusivamente a sus autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (si el autor no es del Ministerio).

INFORME PROSPECTIVO

SOBRE LA SITUACIÓN DE LA ENERGÍA AGRIVOLTAICA

AUTORES:

Rafael López Luque

Luis Manuel Fernández de Ahumada

Pablo Gallego Rodríguez

Francisco Javier Gómez Uceda

Juan Muñoz Peinado

Purificación Fernández García

José Santos Pulido Mancebo

José Cristóbal Ramírez Faz

Marta M^a Varo Martínez

En Córdoba, marzo de 2023



UNIVERSIDAD
DE
CÓRDOBA

El contenido de este informe no es vinculante y, por tanto, no determina la posición del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
2. SISTEMAS AGRIVOLTAICOS	16
2.1. La Agrivoltaica como Solución Alternativa para Compatibilizar la Producción Agrícola y Fotovoltaica	16
2.2. Clasificación de las Instalaciones Agrivoltaicas	18
3. AGRIVOLTAICA: ASPECTOS AGRONÓMICOS	23
3.1. Interacción entre Sistemas Productivos: Influencia de los Colectores Solares en la Agricultura	23
3.1.1. Radiación Solar	24
3.1.2. Temperatura Ambiente en la zona de Cultivo	28
3.1.3. Evapotranspiración	29
3.1.4. Manejo de la Precipitación y Riego	30
3.2. Cultivos Agrivoltaicos: Potencial y Principales Requerimientos	33
4. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS APLICADAS A LA AGRIVOLTAICA	41
4.1. Inteligencia Artificial y Software	41
4.2. Materiales: Módulos Solares Semitransparentes	42
4.3. Estructuras de Montaje y Diseños Optimizados para Sistemas Agrivoltaicos	45
4.4. Diseño de Seguidores Solares Optimizados para Sistemas Agrivoltaicos	48
5. ESTUDIOS DE RENTABILIDAD: INDICADORES	48
5.1. Evaluación de Costes de las diferentes tipologías de Sistemas Agrivoltaicos	48
5.2. Indicadores de Viabilidad de Instalaciones Agrivoltaicos	55
5.3. Modelos de Negocio en Agrivoltaica	60

6. LIMITACIONES DE LA AGRIVOLTAICA	62
6.1. Aceptación Social	62
6.2. Falta de Datos sobre Producción Agrícola en condiciones de Agrivoltaica	65
6.3. Manejo Técnico del Cultivo	65
6.4. Efecto de las Actividades Agrícolas en los Módulos Fotovoltaicos.....	66
6.5. Legislación	67
7. POLÍTICAS Y PROGRAMAS DE FOMENTO DE LA AGRIVOLTAICA	68
7.1. Régimen Jurídico de la Tecnología Agrivoltaica	68
7.2. Prospección de Programas de Fomento de la Agrivoltaica y Proceso de Certificación.....	68
7.2.1. Japón.....	69
7.2.2. Italia.....	70
7.2.3. Alemania	73
7.2.4. Francia.....	78
7.3.5. Massachussets (USA).....	79
8. POTENCIAL DE DESARROLLO DE LA AGRIVOLTAICA EN ESPAÑA.....	81
8.1. Identificación de Zonas con Disponibilidad Nodos de Inyección a la Red Eléctrica.....	81
8.2. Identificación de Cultivos con Potencial Agrivoltaico en España	85
8.3. Instalaciones Agrivoltaicas en España.....	87
8.4. Posibles Impactos Económicos, Técnicos, Sociales y Medioambientales de la Agrivoltaica en España.	91
9. CONCLUSIONES.....	92
10. RECOMENDACIONES	95
REFERENCIAS.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ingresos medios anuales en los principales grupos de cultivo extensivos en España y superficie de los mismos obtenidos a partir de los informes y anuarios publicados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en los años 2021, 2022 y 2023 [21-24]	14
Tabla 2. Revisión sistemática de estudios empíricos sobre rendimiento de cultivos en explotaciones agrivoltaicas	38
Tabla 3. Costes de inversión €/kWp de diferentes diseños de sistemas fotovoltaicos agrícolas en comparación con los sistemas montados en el suelo, tamaño de los gráficos circulares ajustado al monto de la inversión total [159]	49
Tabla 4. Análisis comparativo de inversión de una planta agrivoltaica en Altheim de acuerdo con la evaluación de costes propuesta por Scharf et al. [159].....	51
Tabla 5. Costes (\$/Wp) asociados a los diferentes tipos de instalación consideradas por Horowitz et al. [160].....	53
Tabla 6. Modelos de negocio posibles en la agrivoltaica [41].....	61
Tabla 7. Definiciones de agrivoltaica en Italia [177].....	73
Tabla 8. Categorización de las instalaciones agrivoltaicas en Alemania [180].....	74
Tabla 9. Capacidad de conexión en MW a la red de distribución por provincias	83
Tabla 10. Posibles cultivos con potencial agrivoltaico en España	86
Tabla 11. Instalaciones en España autodenominadas como agrivoltaicas	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Evolución de la potencia fotovoltaica en España [16].....	12
Figura 2.	Distribución geográfica peninsular de las instalaciones de energía solar fotovoltaica a 31.12.2022 [18].....	13
Figura 3.	Distribución de la producción fotovoltaica por superficie [13].....	15
Figura 4.	Evolución de la participación de diferentes países/áreas en la fabricación fotovoltaica [30].....	16
Figura 5.	Clasificación de sistemas agrivoltaicos	20
Figura 6.	Planta piloto del Instituto ISE Fraunhofer de un sistema agrivoltaico elevado [64].....	21
Figura 7.	Estrategias de gestión de irradiancia solar incidente en plantas agrivoltaicas [41]	26
Figura 8.	Interfaz de usuario de Bluewave-Shade [83].....	27
Figura 9.	Estimaciones de la evapotranspiración potencial en función en cada una de las zonas en ensayo [97].....	30
Figura 10.	Cambios cualitativos en los flujos que componen el balance de agua en el suelo [98]	30
Figura 11.	Distribución de pluviómetros en la instalación experimental de Elamri et al. [53].....	31
Figura 12.	Simulación de patrones de distribución de agua en el suelo, en tres zonas y 2 configuraciones: (a) panel plano y (b) estrategia de control de módulos para reducir la heterogeneidad de las precipitaciones [99].....	32
Figura 13.	Evolución temporal de la humedad de suelo: (a) a 20cm de profundidad y (b) a 40cm de profundidad [100].	32
Figura 14.	Producción anual de biomasa seca por metro cuadrado en cada una de las zonas	33
Figura 15.	Curva de respuesta fotosintética a la luz de un cultivo genérico	34
Figura 16.	Planta agrivoltaica Sun'Agri en Francia [108]	35

Figura 17.	Proyecto Regace: Seguidores solares sombreadores en interior de invernadero [120]	37
Figura 18.	Diagrama de bloques del sistema de gestión inteligente SMART AGRIVOLTAICA [132]	41
Figura 19.	Módulos fotovoltaicos semitransparentes para aplicaciones agrivoltaicas [135].....	42
Figura 20.	Módulos semitransparentes desarrollados por LUMO [138].....	43
Figura 21.	Tecnología THEIA desarrollada por Insolight [141].....	44
Figura 22.	Sistema soporte para sistemas agrivoltaicos verticales de Next2Sun [151].....	45
Figura 23.	Plantas agrivoltaicas verticales: ancho interespacial entre colectores solares compatible con labores agrícola [151]	46
Figura 24.	Vallado fotovoltaico [151].....	47
Figura 25.	Diagrama de principio de las cimentaciones sin hormigón Spinnanker	47
Figura 26.	Diagrama de principio de las cimentaciones atornilladas	47
Figura 27.	Evolución del precio del acero [161]	52
Figura 28.	Tipos de instalaciones considerados por Horowitz et al. [160] en su estudio de evaluación de costes: (a) fotovoltaica convencional, (b) fotovoltaica con pastos para ganadería, (c) fotovoltaica sobre vegetación para polinizadores, (d) agrivoltaica elevada, (e) agrivoltaica vertical y (f) agrivoltaica elevada con seguimiento solar.....	53
Figura 29.	Interfaz del programa PVGIS [164].....	56
Figura 30.	Valores experimentales de LER determinados en Heggelbach (Alemania) en 2017 y 2018 [81].....	57
Figura 31.	Estudio comparativo de costes de generación LCOE en sistemas agrivoltaicos [67].....	59
Figura 32.	Diagrama Casual para identificar la interacción de los agentes participantes en una agrivoltaica [167]	63
Figura 33.	Instalaciones de categoría I según la norma alemana DIN SPEC 91434 [180]	75

Figura 34.	Instalaciones de categoría II, variante 1, según la norma alemana DIN SPEC 91434 [180]	76
Figura 35.	Instalaciones de categoría II, variante 2, según la norma alemana DIN SPEC 91434 [180]	76
Figura 36.	Captura de pantalla de Sistema SIG desarrollada para la consulta de información sobre nodos con disponibilidad de inyección	81
Figura 37.	Captura de pantalla de la Aplicación Google Earth Pro desarrollada para la consulta de información sobre nodos con disponibilidad de inyección.....	82
Figura 38.	Aplicación Google Earth Pro desarrollada para la consulta de información sobre nodos de inyección: Información detallada de subestación con disponibilidad de inyección	82
Figura 39.	Propuestas presentadas para el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021-2026 en función del tipo de actuación [187]	84
Figura 40.	Ubicación de nueva generación renovable en el escenario de estudio. Sistema peninsular [187].....	85
Figura 41.	Instalación Agrivoltaica de Iberdrola [Imágenes cedidas por Iberdrola]	88
Figura 42.	Instalación de Huerto Carrasco, Fuentealbilla (Albacete)	89
Figura 43.	Instalación de Huerto del Hito, Fuentealbilla (Albacete)	89
Figura 44.	Instalación Picassent Solar (Valencia).....	90
Figura 45.	Instalación del tipo proyectado por WSP en El Coronil (Sevilla)	90
Figura 46.	Instalación agrivoltaica propuesta para plantaciones arbóreas.....	97
Figura 47.	Instalación agrivoltaica propuesta para plantaciones en setos orientados N-S.....	98
Figura 48.	Instalación agrivoltaica para cultivos extensivos entre colectores inclinados al Sur.....	98
Figura 49.	Instalación agrivoltaica para cultivos extensivos entre colectores verticales en alineación N- S.....	98
Figura 50.	Propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cultivo	99
Figura 51.	Estructura calculada para propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cultivo	100
Figura 52.	Propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cubierta de invernadero.....	100

1. INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático y sus consecuencias negativas para nuestro planeta y los sistemas socioeconómicos son ya una evidencia reconocida por la comunidad científica y la sociedad en general [1]. Para intentar paliar esta situación, es crucial reducir la emisión de gases de efecto invernadero derivados de la acción del hombre, ya que son la principal causa del calentamiento global del planeta. En esta línea, los participantes en la COP21 de París [2] acordaron promover un modelo de progreso tecnológico y financiero de bajas emisiones con el objetivo de mantener el aumento global de la temperatura por debajo de 2°C, e intentando limitarlo a 1,5°C. En relación a la posibilidad de alcanzar estos objetivos, el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en su informe de 2022 señala que, con una mayor ambición climática por parte de los gobiernos, es posible conseguir que el aumento global de la temperatura no supere los 1,5°C [2].

En este contexto, el Pacto Verde para el Clima [3], que engloba las políticas a nivel europeo contra el cambio climático, tiene por objetivo impulsar medidas que permitan conseguir una Unión Europea (UE) climáticamente neutra, moderna y sostenible en 2050 y, de esta forma, alcanzar los compromisos adquiridos en la COP de París. Concretamente, los Estados Miembros se han comprometido a reducir para 2030 las emisiones netas de gases de efecto invernadero, al menos, un 55 % respecto a los valores de 1990. Para ello, se ha lanzado el programa europeo *Fit for 55* que persigue incrementar antes del 2030 las fuentes de energía renovables en el mix energético global entre el 32% y el 40% [4] y que cuenta con apoyo financiero a la inversión en tecnologías renovables.

Por otra parte, la guerra en Ucrania ha evidenciado la alta dependencia de la UE respecto a la importación de combustibles fósiles y los riesgos que esto conlleva para la economía [5]. Por todo ello, la UE y sus Estados Miembros se encuentran inmersos en un proceso acelerado de cambio del sistema energético para hacer frente a los retos medioambientales, económicos y políticos a los que se enfrenta en estos momentos [6].

En este contexto, si bien su implementación no es la única solución y es necesario complementarla con otras medidas de reducción del consumo energético, de mejora de la eficiencia energética y de fomento de la sostenibilidad, las energías renovables, en general, y la fotovoltaica, en particular, son fundamentales en este proceso de transición verde.

Concretamente, por lo que respecta a la fotovoltaica, la UE tiene como objetivo fomentar la inversión en esta tecnología y, tal y como recoge el plan REPowerEU, duplicar la potencia fotovoltaica instalada para 2025 e instalar 60 GW para 2030 [6]. Para ello, ha establecido un marco normativo y financiero [7], que contempla los siguientes ejes:

- **Incentivos fiscales y financieros:** Se han establecido subsidios y otros incentivos fiscales y financieros para fomentar la inversión en energía fotovoltaica.
- **Normativas y regulaciones:** La UE ha establecido requisitos normativos y regulaciones para fomentar la adopción de la energía fotovoltaica en los Estados miembros. Esto incluye la certificación de los paneles solares, los requisitos de conexión a la red eléctrica, y la eliminación de barreras a la importación de paneles solares en el mercado común.

Estas medidas de fomento de la tecnología están dando lugar a un marcado crecimiento en el número de plantas fotovoltaicas. Según el informe anual fotovoltaico de 2022 de EurObserv'er, observatorio europeo del desarrollo de las energías renovables, a pesar de la Covid-19, la capacidad fotovoltaica (PV) a nivel mundial despegó en el año 2020 [8]. Paralelamente, el informe Trends in Photovoltaic Applications 2022 de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [9] identifica la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial en 2021 en 173,5 GWp, lo que representa un incremento del 20.7 % respecto a los 145,2 GWp instalados en el año anterior (2020) y eleva la capacidad mundial de producción fotovoltaica a 945.4 GWp. Por lo que respecta a la UE, de acuerdo con el referenciado informe, su capacidad neta aumentó en 28,7 GWp en 2021 registrando un crecimiento del 34 % respecto al año 2020.

En el ámbito nacional, la Ley 17/2021 de Cambio Climático y Transición Energética [10] define medidas de descarbonización en España que persiguen alcanzar la neutralidad climática de nuestro país antes de 2050. En esta línea, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) tiene por objetivo reducir la dependencia energética del país en la próxima década, alcanzando niveles de emisiones cero para el año 2050 [11]. Para lograr las metas definidas se han elaborado distintas iniciativas, tales como el Proyecto de Real Decreto por el que se regula el Régimen Económico de Energías Renovables para instalaciones de Producción de Energía Eléctrica [12]. En dicho plan se contempla la instalación de 5000 MW/año de potencia proporcionada por fuentes renovables para el período 2021-2030.

Fruto de este impulso gubernamental, la energía solar fotovoltaica en España está creciendo significativamente en los últimos años, tanto en instalaciones conectadas a red como de autoconsumo (Figura 1). Y es que España tiene un gran potencial de crecimiento fotovoltaico por su ubicación geográfica y el elevado número de horas de sol que recibe [13]. Por otra parte, la energía fotovoltaica presenta importantes ventajas como son su disponibilidad en cualquier lugar, su fácil instalación y bajo coste de mantenimiento y de adquisición, así como el paulatino aumento de su eficiencia y durabilidad, que conlleva a un descenso del LCOE (Levelized Cost of Energy) asociado a la producción fotovoltaica [14,15].

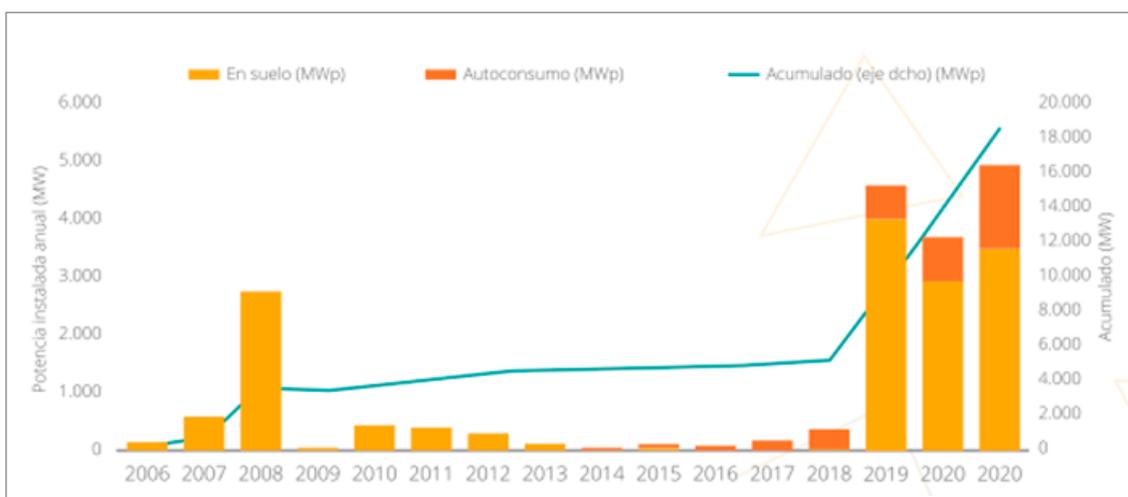


Figura 1. Evolución de la potencia fotovoltaica en España [16].

Por todo ello, tal y como afirma la Unión Española Fotovoltaica (UNEF) en su último informe publicado en 2022 [16], la potencia fotovoltaica instalada en plantas en suelo durante el año 2021 ha alcanzado los 3,5 GWp frente a los 2,9 GWp instalados en 2020, lo que supone un crecimiento del 21%. De esta forma, en términos de potencia acumulada, la fotovoltaica alcanza en la actualidad (marzo de 2023) 19,91 GW de acuerdo con los datos de Red Eléctrica Española [17]. Este crecimiento ha hecho posible que la presencia de la fotovoltaica en el mix de generación energética de nuestro país haya aumentado en 2021 hasta el 8,1 %, representando el 20% de la generación renovable.

Sin embargo, la distribución de la potencia fotovoltaica en las diferentes comunidades autónomas no es uniforme (Figura 2) [18]. En este sentido, la tasa de ocupación del terreno para la implantación de centrales fotovoltaicas en cada comunidad se encuentra estrechamente relacionada con el crecimiento de la potencia instalada de esta tecnología. Así, dado que, según la UNEF, la potencia fotovoltaica para autoconsumo actual (marzo 2023) es de 5 GW [19], y que ésta en su gran mayoría está situada sobre cubiertas, pérgolas y en terrenos de carácter urbano, podríamos estimar que, de los 19,91 GW de potencia fotovoltaica instalada [17], aproximadamente 14,91 GW estarían instalados en suelo. De esta forma, considerando una tasa de ocupación de 2 ha/MW, la potencia fotovoltaica instalada supondría alrededor de 30.000 ha de superficie dedicadas a instalaciones fotovoltaicas, lo que representa el 0,17% de las tierras de cultivo en España. De acuerdo con estos cálculos, el objetivo establecido por el PNIEC que implica la implantación de 39 GW fotovoltaicos en el sistema eléctrico nacional para el año 2030 [11], llevaría a la ocupación de 60.000 ha por parte de las plantas fotovoltaicas (0,34 % de las tierras de cultivo). Sin embargo, la revisión al alza del objetivo fotovoltaico hace pensar en una mayor ocupación fotovoltaica de la anteriormente estimada [20].

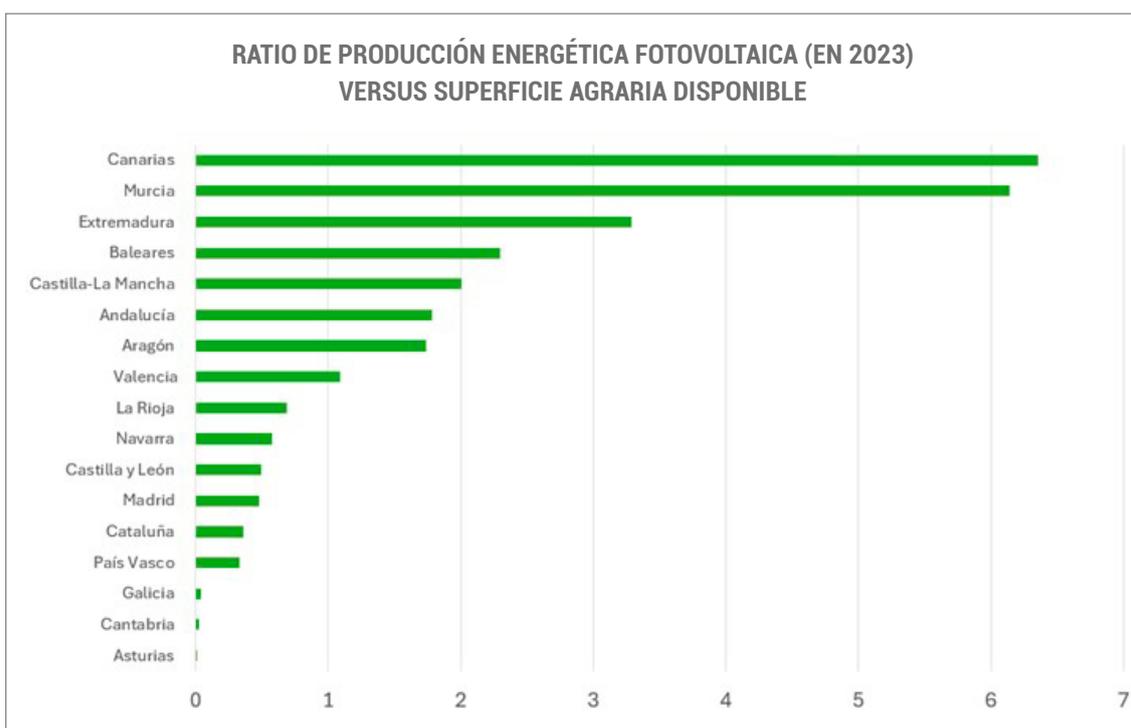


Figura 2. Geográfica de las instalaciones de energía solar fotovoltaica en España en 2023.

(Fuente: Elaboración a partir de [21,22]).

En relación a este cambio de uso del suelo de agrícola a fotovoltaico, es importante señalar que dicho cambio viene motivado por la mayor rentabilidad de las instalaciones fotovoltaicas frente a la de gran número de cultivos. Para evidenciar estas circunstancias, se presenta un análisis que, si bien no pretende ser un estudio exhaustivo de rentabilidades, compara una situación optimista de rentabilidad para un uso agrícola del terreno con una situación pesimista para su uso fotovoltaico, obteniéndose que, incluso en estas circunstancias, para la mayoría de los cultivos, la rentabilidad agrícola es inferior a la asociada a la explotación fotovoltaica del terreno.

TABLA 1. Ingresos medios anuales en los principales grupos de cultivo extensivos en España y superficie de los mismos obtenidos a partir de los informes y anuarios publicados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en los años 2021, 2022 y 2023 [23–26]

CULTIVO	RENDIMIENTO SECANO (kg/ha)	RENDIMIENTO REGADÍO (kg/ha)	PRECIO PERCIBIDO AGRICULTOR (€/kg)	INGRESOS SECANO (€/ha)	INGRESOS REGADÍO (€/ha)
CEREALES					
TRIGO BLANDO	4016	5621	0.3642	1463	2047
CEBADA	3818	5515	0.3368	1286	1857
MAIZ	6011	12630	0.3422	2057	4322
LEGUMINOSAS GRANO (LE)					
LENTEJAS	1142	1831	0.8233	940	1507
GARBANZOS	1171	1688	0.8974	1051	1515
VEZA	1319	1707	0.44	580	751
TUBERCULOS C. H. (TU)					
PATATA	15843	36215	0.3797	6016	13751
INDUSTRIALES (IN)					
GIRASOL	1241	2385	0.6227	773	1485
COLZA	2468	3381	0.3207	791	1084
FORRAJERAS (FO)					
ALFALFA	13429	53708	0.2635	3539	14152
FRUTALES CITRICOS (CI)					
NARANJO		26894	0.224		6024
MANDARINO		24717	0.3869		9563
LIMONERO		27051	0.389		10523
FRUTALES NO CITRICOS (FR)					
ALMENDRO	442	2233	1.2314	544	2750
MANZANO	7992	26425	0.5471	4372	14457
MELOCOTONERO Y NECTARINAS	3623	20441	0.8529	3090	17434
CEREZO Y GUINDO	2090	4123	1.4493	3029	5975
PLATANERA		47871	0.6607	-	31628
AGUACATE	3860	7685	1.5521	5991	11928
VIÑEDO (VI)					
UVA MESA	2849	22144	0.7176	2044	15891
UVA VINIFICACION	5318	13184	0.3437	1828	4531
OLIVAR (OL)					
OLIVAR TRADICIONAL	3500	6000	0.911	3189	5466
OLIVAR INTENSIVO	5000	10000	0.911	4555	9110
OLIVAR SUPERINTENSIVO	6000	12000	0.911	5466	10932

De esta forma, de acuerdo con la hipótesis optimista de rentabilidad agrícola que se ha adoptado, ante la variabilidad de los costes de cultivo, se ha escogido la variable ingresos que, en todo caso, es superior al beneficio agrícola. Así, la Tabla 1 muestra los rendimientos medios de los principales grupos de cultivos de España obtenidos a partir de los informes y anuarios publicados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en los años 2021, 2022 y 2023 [23–26].

Por otra parte, se ha obtenido una estimación media de la rentabilidad por superficie de las diferentes plantas fotovoltaicas a partir de un estudio analítico de 70 proyectos seleccionados aleatoriamente entre los expuestos a exposición pública en España entre los años 2021 y 2022 [13]. Para ello se considera el indicador D_E ($\text{MWh}\cdot\text{año}^{-1}/\text{ha}$), que representa la densidad energética o relación entre el nivel de producción energética de la instalación ($\text{MWh}/\text{año}$) y la superficie de terreno (en ha) que ocupa toda la instalación fotovoltaica. El histograma correspondiente (Figura 3) pone de manifiesto que, en más de la mitad de las instalaciones considerada (51,42%), esta densidad energética varía entre 900 y 1.300 $\text{MWh}/\text{ha}\cdot\text{año}$, llegando a alcanzar en 2 instalaciones (2.86 % de los casos estudiados) valores superiores a 2.100 $\text{MWh}/\text{ha}\cdot\text{año}$.

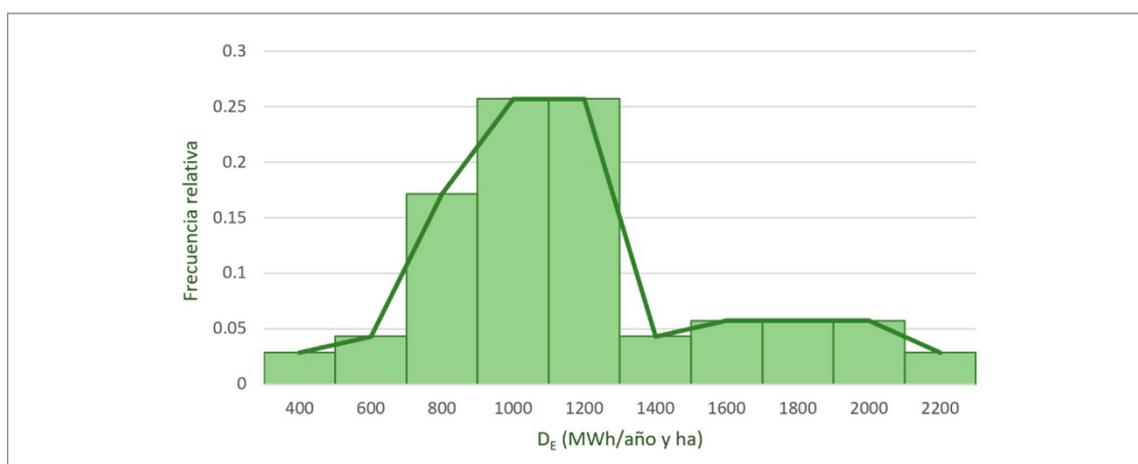


Figura 3. Distribución de la producción fotovoltaica por superficie [13].

Si bien actualmente el régimen de retribución de la electricidad fotovoltaica generada y vendida a la red es superior, para estimar los ingresos anuales en este tipo de instalaciones fotovoltaicas frente a las explotaciones agrícolas, se considera una situación muy desfavorable para las primeras con una estimación pesimista de retribución de 0,03 €/kWh, lo que es equivalente a 30 €/MWh. De esta forma, bajo esta hipótesis pesimista, el 51,42 % de las instalaciones fotovoltaicas estudiadas se situarían entre 18.000 y 39.000 €/ha·año, y algunas llegarían incluso a 69.000 €/ha·año. La mayor rentabilidad de la tierra en el caso de instalaciones fotovoltaicas frente a la agricultura ha facilitado a los promotores de este tipo de plantas disponer de los terrenos necesarios para su implementación, siendo el modelo más común el de alquiler de terrenos agrícolas a cambio de rentas equivalentes o incluso superiores a los beneficios agrícolas [27–31].

Sin embargo, este modelo de crecimiento de la fotovoltaica dentro del mercado energético del país está sometido a una serie de amenazas que ponen en riesgo su desarrollo. Entre dichas amenazas cabe destacar:

- **Saturación de líneas de evacuación eléctrica:** Tal y como se muestra en el epígrafe 7.1, actualmente las redes eléctricas están alcanzando su límite máximo de capacidad de transporte. Consecuentemente, sin refuerzo, ampliación y extensión de redes el modelo de crecimiento fotovoltaico se verá frenado.
- **Dependencia externa:** La Figura 4 muestra la evolución entre 2010 y 2021 de la participación de los diferentes países en la fabricación de los diferentes segmentos de la tecnología fotovoltaica [32]. En ella se pone de manifiesto un significativo desplazamiento geográfico en cuanto a la capacidad de fabricación hacia China que, actualmente, domina significativamente todos los segmentos de cadena de suministros de energía solar fotovoltaica. Este escenario, junto con los fuertes desencuentros geopolíticos del momento, hace dudar de un suministro garantizado.

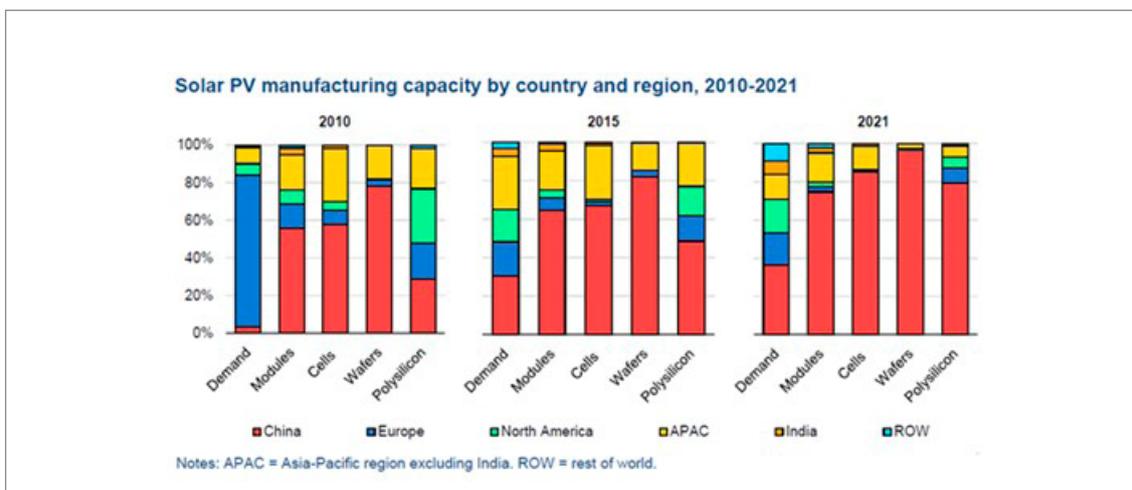


Figura 4. Evolución de la participación de diferentes países/áreas en la fabricación fotovoltaica [32].

Ante estas perspectivas sería deseable un modelo equilibrado que facilitase la compatibilización de la producción agrícola y fotovoltaica.

2. SISTEMAS AGRIVOLTAICOS

2.1. La Agrivoltaica como Solución Alternativa para Compatibilizar la Producción Agrícola y Fotovoltaica

De acuerdo con lo expuesto, el crecimiento del número de plantas fotovoltaicas conectadas a red en grandes parcelas de tierra conlleva un cambio en el uso del terreno [33,34]. Como consecuencia, en los últimos años han surgido opiniones en contra de la construcción de las comúnmente denominadas "mega plantas fotovoltaicas" [35–40], argumentando posibles efectos negativos para el sector agrícola y la producción agroalimentaria [34], la economía y el valor paisajístico de las zonas rurales y el medioambiente [41,42].

En este contexto, con el fin de conjugar los objetivos de producción de alimentos y energía renovable, sin que ambas actividades supongan una disyuntiva, surge el concepto de la agrivoltaica que combina ambas producciones en un mismo terreno [43–46]. Y es que mientras la eficiencia intrínseca del proceso fotosintético es actualmente bastante baja (alrededor del

3%), la de los paneles solares monocristalinos disponibles en el mercado alcanza un valor medio superior al 20%. De esta forma, en la producción agrivoltaica se intenta optimizar el aprovechamiento de la energía solar y de los campos de cultivo proponiendo combinaciones de paneles solares y cultivos en la misma unidad de tierra.

Los precursores de este nuevo modelo fueron Goetzberger & Zastrow [47] que en 1982 idearon una planta fotovoltaica con paneles solares sobre estructuras de 2 m de altura y separadas entre sí por calles de 6 m de ancho. Con este diseño pretendían que la radiación solar llegase al suelo con niveles adecuados para el cultivo agrícola.

Sin embargo, este concepto no empezó a desarrollarse en la práctica hasta principios del siglo XXI. Concretamente, en 2004, bajo la denominación de "solar sharing", Nagashima desarrolló en Japón el primer estudio piloto con el objetivo de analizar el comportamiento de los cultivos plantados bajo módulos fotovoltaicos [48]. Dicho estudio, sentó las bases para el primer programa gubernamental de fomento de la agrivoltaica en 2012. Posteriormente, también en Asia, concretamente en China (país con mayor capacidad agrivoltaica instalada del mundo actualmente [49]), en 2014 se instalaron los primeros sistemas agrivoltaicos a gran escala.

A nivel europeo, el programa de I+D desarrollado en Francia por el Institut National de la Recherche Agronomique (INRAe') resultó fundamental para el avance de la agrivoltaica. De hecho, el pionero de esta línea de trabajo, Christian Dupraz, fue quien utilizó por primera vez el término "agrivoltaic" para hacer referencia al uso compartido del terreno para producción agrícola y fotovoltaica en un primer estudio en el que, a partir de la simulación del comportamiento de las plantas agrivoltaicas, encontraron que la productividad de la tierra en este tipo de instalaciones podía aumentar entre un 35 y un 73 % [50].

Desde estos inicios, dado el carácter multidisciplinar de la investigación en este ámbito, diversos estudios han analizado la agrivoltaica, tanto desde la perspectiva agrícola y energética, como económica o de su posible impacto social, encontrando múltiples ventajas de este nuevo modelo productivo. Entre las ventajas identificadas, que se irán detallando a lo largo de este informe, cabe destacar que numerosos estudios han concluido que la agrivoltaica contribuye a paliar el conflicto por el uso del terreno [43,51,52], ya que permite producir energía renovables sin poner en riesgo el suministro de alimentos de la creciente población mundial [43–46], ni los entornos paisajísticos y las economías de las zonas rurales [43–46,53].

Por otra parte, desde hace años el sector agrícola afirma encontrarse inmerso en una gran crisis de rentabilidad debido a que los precios en origen no cubren los costes de producción, los cuales son cada vez más altos por el alza de los precios de los carburantes y fertilizantes y de los costes laborales. En este sentido, si bien la agrivoltaica no es la solución a esta situación, siendo necesarias medidas políticas que persigan que la actividad agrícola sea rentable por sí misma, el uso dual del terreno puede contribuir a paliar la situación ya que mejora el rendimiento, la productividad y la eficiencia del terreno y aumenta y diversifica los ingresos, a la vez que reduce su dependencia respecto a las condiciones climatológicas [50,54–57], al sumar a los beneficios propiamente agrícolas los derivados de la venta de la electricidad o el alquiler de tierras al propietario del sistema agrivoltaico [43].

Concretamente, por lo que respecta a la generación fotovoltaica, la electricidad producida puede inyectarse a la red contribuyendo a la generación descentralizada de energía y al aumento de la contribución de las renovables en el mix energético, a la vez que se disminuye la demanda energética del sector agrícola y la necesidad de recurrir a fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.

De esta forma, la agrivoltaica puede suponer una oportunidad como fuente simultánea de alimentos y energía, contribuyendo a disminuir las emisiones de gases invernadero y avanzar en la lucha contra el cambio climático [52,58] a la vez que se impulsa la economía de las zonas rurales [44–46,53].

Por todo ello, países como Holanda, Alemania, Italia y Francia, en Europa, o Estados Unidos (en el estado de Massachusetts), Corea del Sur, China, Japón, India, Israel, más allá del continente europeo, están implantando planes gubernamentales de apoyo a la agrivoltaica. Así, la capacidad fotovoltaica instalada en plantas agrivoltaicas a nivel mundial ha aumentado desde los 5 MWp instalados en 2012 hasta los más de 14 GWp en 2021 [43].

En este contexto, dado el elevado número de horas de Sol que recibe el territorio español y ante las perspectivas de expansión de la fotovoltaica en los próximos años en línea con el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, resultarían indicados la regulación e impulso de la agrivoltaica en España, protegiendo el sector agrícola que resulta esencial para la economía y el PIB del país.

De esta forma, como primer paso en esta línea, el presente informe tiene como objetivo recoger los avances científico-técnicos desarrollados en estas últimas décadas en el campo de la agrivoltaica, ofreciendo una descripción realista de la situación de este sector emergente a partir de la cual, en su caso, poder establecer una definición de agrivoltaica en España y sentar las bases de un plausible marco regulatorio para este tipo de instalaciones y las correspondientes actuaciones incentivadoras a explotaciones agrivoltaicas.

2.2. Clasificación de las Instalaciones Agrivoltaicas

Tal y como se ha señalado anteriormente, la agrivoltaica consiste en la integración en un mismo terreno de sistemas de producción eléctrica renovables basados en tecnología fotovoltaica junto con sistemas de producción agrarios. De acuerdo con esta definición, por lo que respecta a la producción agraria, las instalaciones agrivoltaicas pueden integrar sistemas tanto agrícolas como ganaderos. Sin embargo, ante las dificultades de regular un modelo agrivoltaico basado en la ganadería en el que realmente se dé prioridad a este sector frente al fotovoltaico, se considera que en una primera fase de fomento de la agrivoltaica en España conviene centrarse en aquellos sistemas agrivoltaicos que combinan la producción fotovoltaica y agrícola, siendo este el enfoque más extendido a nivel mundial y el que se aborda en el presente informe prospectivo sobre el estado de la agrivoltaica.

De acuerdo con la bibliografía científica, en función del diseño inicial se pueden distinguir tres tipos de plantas agrivoltaicas [59,60]:

1. Plantas que se plantean desde su origen como plantas agrivoltaicas con un diseño exprofeso en el que los paneles fotovoltaicos se distancian y/o elevan para favorecer la incidencia de la radiación solar sobre el cultivo.
2. Plantas agrivoltaicas que surgen a partir de tierras en explotaciones agrícolas ya existentes que incorporan sistemas de generación de energía mediante tecnología fotovoltaica.
3. Plantas agrivoltaicas que surgen a partir de plantas fotovoltaicas ya existentes que se reconvierten mediante la introducción de un cultivo que pueda desarrollarse adecuadamente bajo los colectores solares [44,61,62] o en las calles entre los mismos [45,63].

En los dos primeros casos (agrivoltaica exprofeso y explotación agrícola reconvertida en agrivoltaica) el foco de atención recae sobre la protección de la producción agrícola y la tecnología fotovoltaica es un sistema complementario. Frente a estos, en el tercer caso, la producción fotovoltaica se mantiene como sistema principal, si bien, se reformula para adaptarlo a un sistema agrivoltaico compatible con la producción de alimentos y el equilibrio económico, energético y medioambiental en nuestro planeta. Si bien los autores de este documento consideran que en los sistemas agrivoltaicos se debe proteger predominantemente la producción agrícola frente a la eléctrica, en este informe prospectivo se recogen también resultados de estudios sobre la reconversión de plantas PV en cuanto que suponen un primer avance hacia la integración de ambas actividades productivas. Así, se propone refundir las dos primeras tipologías en una sola bajo la denominación de "plantas agrivoltaica predominantemente agrícolas" y que se distinguen de las "plantas fotovoltaicas reconvertidas a agrivoltaicas" por el hecho de que, en las primeras, el acento se pone en la producción del cultivo y no en la actividad energética como ocurre en las segundas. En este sentido, algunos autores consideran que es difícil controlar el ambiente de crecimiento de los cultivos en estas plantas fotovoltaicas ya existentes, por lo que es conveniente que las plantas agrivoltaicas sean diseñadas para el uso dual del terreno desde su inicio, de manera que la altura y separación entre colectores solares permita una incidencia solar en el cultivo suficiente para satisfacer las demandas del cultivo, así como para permitir las labores agrícolas necesarias [33]. Sin embargo, estudios experimentales como los de Kumpanalaisatit et al. [61] y Malu et al. [45] han integrado satisfactoriamente diferentes cultivos agrivoltaicos en plantas fotovoltaicas preexistentes, obteniendo rendimientos energéticos y agrícolas adecuados. De esta forma, según la bibliografía científica, teniendo en cuenta los requerimientos de luz solar y la altura del cultivo [64], la producción agrícola de determinados cultivos en plantas agrivoltaicas podría ser eficiente, tanto en plantas fotovoltaicas reconvertidas como en plantas agrivoltaicas diseñadas exprofeso [65].

Por otra parte, según la disposición espacial de los colectores solares en el terreno de cultivo, los sistemas agrivoltaicos pueden ser:

1. Elevados: cuando los colectores solares se disponen sobre estructuras con una altura suficiente que permita el paso de la maquinaria agrícola y el desarrollo de las labores de mantenimiento del cultivo.
2. Interespaciales: cuando el cultivo se dispone en el espacio libre entre las filas de colectores solares, separando estas la distancia suficiente para el desarrollo de las labores agrícolas.

3. Sobre Invernaderos: cuando los colectores solares se disponen sobre la estructura propia de los invernaderos, pero sin reemplazamiento de esta.

De la combinación de ambas clasificaciones, en este informe se propone una nueva clasificación que se resume en la Figura 5.

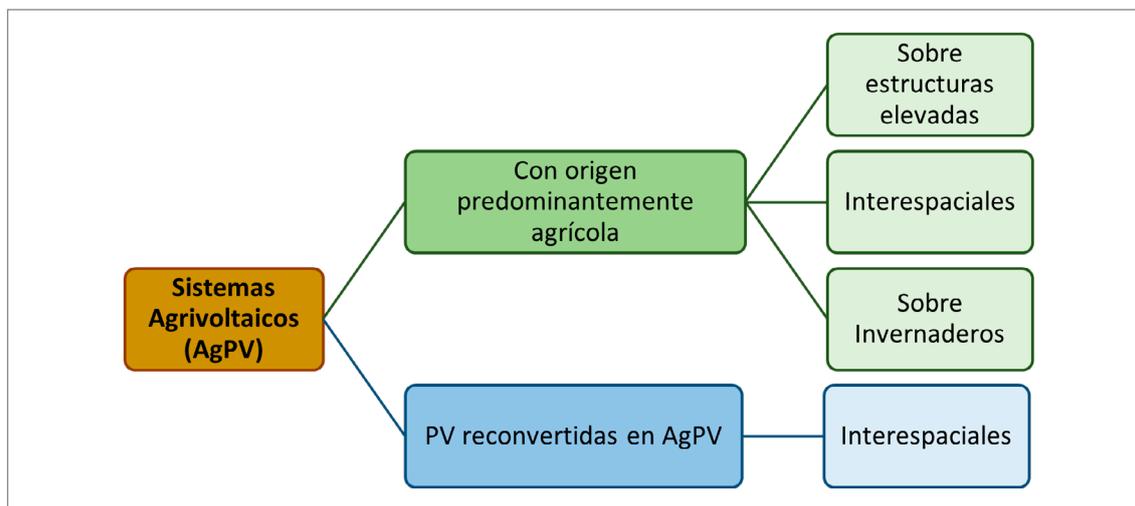


Figura 5. Clasificación de sistemas agrivoltaicos.

De acuerdo con la clasificación propuesta, las **plantas agrivoltaicas interespaciales** pueden ser diseñadas exprofeso o plantas fotovoltaicas conectadas a red ya existentes que se reconvierten y rediseñan como plantas agrivoltaicas cultivando en los espacios entre las filas de colectores, ya sean estos fijos o con seguimiento solar, e incluso suprimiendo filas de colectores solares cuando el cultivo lo requiera. En cualquier caso, en estas plantas agrivoltaicas los paneles no se elevan en altura, sino que se instalan sobre estructuras a ras de suelo o con una altura muy pequeña y el cultivo se dispone entre las filas de colectores. De esta forma, en una planta agrivoltaica interespacial el cultivo y el ancho de las calles entre colectores solares están interrelacionados, ya que el ancho de calles determina, entre otras cosas, la maquinaria agrícola que se puede utilizar. Así, por ejemplo, cuando estas plantas agrivoltaicas se destinan a cultivos herbáceos, las distancias entre filas de colectores deben ser grandes debido al gran tamaño de la maquinaria agrícola necesaria. Además, frecuentemente los cultivos herbáceos requieren que la distribución espacial de la irradiancia incidente sobre el cultivo sea homogénea para que la maduración de la cosecha sea uniforme, por lo que es necesario tener en cuenta este criterio en el diseño de la instalación fotovoltaica, ya sea mediante la separación de las filas de colectores o mediante su orientación a lo largo de direcciones con un sombreado más homogéneo [43].

Conviene señalar que se han encontrado en la literatura científica pocos sistemas agrivoltaicos interespaciales experimentales en los que se hayan supervisado las actividades agrícolas.

Por último, es importante tener en cuenta que en este tipo de plantas se corre el riesgo de que se priorice la producción eléctrica frente a la agrícola, sobre todo cuando el sistema agrivoltaico tiene su origen en una gran planta fotovoltaica conectada a red preexistente. Por ello, es especialmente importante definir unos criterios claros que permitan diferenciar entre

plantas fotovoltaicas con una aportación agrícola reducida y plantas realmente agrivoltaicas, en las que el peso del sistema agrícola sea suficientemente significativo.

Frente a los sistemas agrivoltaicos interespaciales, en los **sistemas agrivoltaicos elevados** los paneles fotovoltaicos (fijos o con seguimiento solar) se montan sobre estructuras elevadas entre 2 y 6 m, de manera que el cultivo pueda crecer bajo los mismos, dependiendo dicha altura del cultivo y de la maquinaria agrícola necesaria para su mantenimiento y producción. Así, los colectores en altura sirven de protección al cultivo frente a la irradiancia solar y fenómenos meteorológicos adversos. Además, la estructura elevada reduce la probabilidad de sustracción de los equipos fotovoltaicos [43].



Figura 6. Planta piloto del Instituto ISE Fraunhofer de un sistema agrivoltaico elevado [66].

La Figura 6 muestra una instalación piloto de un sistema agrivoltaico elevado desarrollado por el Instituto ISE de Fraunhofer en el lago de Constanza (Alemania) en el que los colectores solares se han instalado sobre estructuras elevadas 5 m de altura. Como puede apreciarse en la Figura 6, el espacio requerido en esta configuración para la instalación fotovoltaica es menor que en sistemas agrivoltaicos interespaciales convencionales con colectores solares inclinados. Como consecuencia, el nivel de conservación de la biodiversidad aumenta, favoreciendo una mayor aceptación de la tecnología fotovoltaica por parte de los sectores de la sociedad reacios a ella. Además, en este tipo de instalaciones suele priorizarse la producción agrícola frente a la energética, de manera que el porcentaje de sombreado suele variar entre el 20 y el 50%, dependiendo de la separación entre las filas de colectores [43]. No obstante, algunos sistemas agrivoltaicos elevados desarrollados en Japón han llegado a diseñarse con un 70% de tasa de sombreado, encontrando que resultan eficientes para algunos cultivos como el champiñón [67].

Sin embargo, el coste de las estructuras metálicas sobre las que se disponen los colectores solares aumenta con la altura de estas. Además, las cargas de viento en las agrivoltaicas elevadas son mucho mayores que en las interespaciales, lo que repercute en unas mayores

exigencias en la cimentación de los sistemas. Estos mayores requerimientos tienen un doble inconveniente. Por un lado, pueden obligar a recurrir a cimentaciones de hormigón a las que los agricultores permanecen reacios por preferir instalaciones fácilmente reversibles y que no impliquen la reducción de terreno cultivable. Por otro lado, repercuten directamente en un mayor incremento del coste de construcción de la instalación [43]. Precisamente, el mayor coste económico de esta tipología de agrivoltaica asociado al coste de las estructuras elevadas para los colectores solares dificulta la expansión de este modelo, especialmente en países donde no existen ayudas económicas a la agrivoltaica.

Por lo que respecta a los cultivos, los sistemas agrivoltaicos elevados suelen combinarse con cultivos herbáceos y hortícolas. Sin embargo, las explotaciones agrícolas de cultivos herbáceos se encuentran frecuentemente más alejadas de los núcleos urbanos que las explotaciones hortícolas y, consecuentemente, de la red, por lo que la conexión de los sistemas fotovoltaicos a la misma es más cara e incluso puede ser más complicada por requerir permisos de paso y ocupación. Por tanto, para que la inversión necesaria para la conexión a red sea rentable es necesario que la capacidad fotovoltaica de la planta sea suficientemente elevada, lo que empuja hacia sistemas agrivoltaicos con un mayor despliegue fotovoltaico [43].

Por otro lado, la agrivoltaica elevada presenta importantes ventajas para los cultivos hortícolas ya que, como se ha dicho anteriormente, los colectores solares proporcionan la protección que estos cultivos necesitan frente a la lluvia, el granizo y el viento [43,68]. Simultáneamente, las propias estructuras elevadas que soportan a los colectores solares pueden servir para fijar redes o sistemas de protección adicionales si fuesen necesarios [69]. Asimismo, los paneles fotovoltaicos también pueden proteger a los cultivos de una irradiación solar excesiva que pueda perjudicar al cultivo [50,54,65,70]. En este sentido, el uso de seguidores solares puede ser especialmente interesante ya que permitiría regular la irradiación incidente en función de las necesidades del cultivo en cada momento [55,71–73]. Esta medida, si bien incidiría en una menor producción eléctrica, resultaría beneficiosa para el cultivo y favorecería un equilibrio ajustado entre ambas producciones.

A modo de resumen comparativo, en general, los sistemas agrivoltaicos interespaciales son más económicos debido al menor coste de las estructuras soporte para los colectores solares que aumenta considerablemente en el caso de las plantas agrivoltaicas elevadas por la gran cantidad de acero necesario. Sin embargo, los sistemas agrivoltaicos sobre estructuras elevadas se diferencian más respecto a la fotovoltaica convencional por lo que pueden tener una mayor aceptación social [43]. Por otra parte, si bien a priori no existen limitaciones, comúnmente los sistemas interespaciales se combinan con cultivos herbáceos mientras que los sistemas sobre estructuras elevadas también se consideran compatibles con la horticultura, viña y frutales. Sin embargo, en este sentido, Casares et al. [74] han demostrado que los sistemas agrivoltaicos interespaciales también son aptos para cultivos arbóreos en seto, abriendo el espectro de cultivos a implantar en este tipo de plantas agrivoltaicas.

Finalmente, es importante señalar en esta clasificación el papel de los *invernaderos* en el ámbito de la agrivoltaica que experimentó un importante auge en el lustro 2005-2010 impulsado por las altas primas a la producción fotovoltaica que se establecieron en diferentes países mediterráneos. En este contexto, se realizaron inversiones a gran escala para el desarrollo de

invernaderos fotovoltaicos donde se buscaba maximizar la producción de energía en aras a garantizar una alta rentabilidad de la inversión:

1. Evitando cualquier sombra en los generadores fotovoltaicos,
2. Eligiendo una orientación Este (E) - Oeste (W) para el eje del invernadero y, consecuentemente, una orientación Sur para los techos fotovoltaicos.
3. Dotando al invernadero de aberturas diseñadas para enfriar la cubierta posterior de los módulos fotovoltaicos y optimizar, con ello, su eficiencia.

Sin embargo, en la mayoría de los casos esta integración de la fotovoltaica en los invernaderos afectaba negativamente al rendimiento agronómico por el bajo nivel de radiación solar incidente [75,76]. Consecuentemente, el uso agrícola de estos invernaderos fotovoltaicos quedaba limitado a especies con bajas necesidades de radiación solar (planta ornamental de interior o setas). Sin embargo, la creciente demanda en los últimos años de frutos rojos, especies con muy bajos requerimientos radiativos, y su alta rentabilidad, ha dado lugar a que se mantengan altas tasas de cobertura fotovoltaica en invernaderos. Frente a esta situación de predominio de la producción energética, actualmente, se intenta integrar el modelo agrivoltaico con predominio de la agricultura [50] en invernaderos de hortalizas.

Conviene señalar que en invernaderos resulta especialmente importante controlar la disponibilidad de radiación solar. Así, en los países mediterráneos, mientras que en invierno los valores de radiación fotosintéticamente activa (PAR) son insuficientes, cuando no limitantes, para la producción agrícola en invernaderos, durante los meses de verano son demasiado elevados, llegando a ser necesario blanquear los plásticos y disponer mallas de sombreo para proteger los cultivos [77]. De acuerdo con esto, disponer módulos fotovoltaicos en un determinado porcentaje de la cubierta de invernaderos podría ser beneficioso durante los meses de verano, pero agravaría el problema en invierno. Por ello, es fundamental estudiar detalladamente el comportamiento de la radiación solar en invernaderos agrivoltaicos, ya que puede afectar al crecimiento y rendimiento de los cultivos tradicionales, principalmente cuando la disponibilidad del recurso solar es menor.

3. AGRIVOLTAICA: ASPECTOS AGRONÓMICOS

3.1. Interacción entre Sistemas Productivos: Influencia de los Colectores Solares en la Agricultura

La agricultura contribuye al cambio climático a la vez que se ve afectada por el mismo. Por lo que respecta a la contribución al cambio climático, el sector productivo agrícola es uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero [78]. Por ejemplo, el uso de fertilizantes nitrogenados orgánicos y minerales provoca emisiones de óxido nitroso. Por tanto, es necesario adaptar el sistema de producción alimentaria para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, ante el aumento de la demanda de alimentos derivada del crecimiento de la población mundial, esta adaptación no se puede basar en la reducción de la producción, ya que eso pondría en riesgo la seguridad alimentaria, provocando desabastecimiento y encarecimiento de los alimentos.

Por otra parte, las consecuencias del cambio climático afectan a la climatología y, por ende, a la agricultura. Así, por ejemplo, mientras que la disminución de heladas en los países del

Norte beneficia a su agricultura, la mayor frecuencia de olas de calor y la disminución de precipitaciones afecta negativamente a la producción en los países de clima mediterráneo, como España. Asimismo, el incremento de ocurrencia de episodios meteorológicos extremos (lluvias torrenciales, granizo, olas de calor extremas) pone en riesgo la producción agrícola, dando lugar a fluctuaciones en los ingresos de las explotaciones agrícolas y afectando a su rendimiento, lo que acentúa los problemas económicos de los agricultores [43].

La agrivoltaica puede contribuir a abordar simultáneamente ambos retos. Y es que los paneles fotovoltaicos bloquean parte de la irradiancia solar incidente sobre el cultivo y lo sombrea parcialmente. Este bloqueo de la irradiancia solar puede afectar a la producción del cultivo positiva o negativamente [50,54,70,71,79,80]. Por un lado, un bloqueo excesivo de irradiancia puede disminuir la producción en determinados cultivos. Por otro lado, las sombras parciales de los colectores sobre el cultivo pueden resultar positivas en determinadas condiciones ya que dan lugar a que la temperatura en el cultivo y en el terreno disminuya [79], protegiendo, por tanto, al cultivo de un calor excesivo y de las quemaduras solares [65,79]. Igualmente, disminuye la evapotranspiración [65] y, por tanto, la demanda de agua [81], lo que repercute positivamente al balance hídrico del suelo [54,73], pudiendo ser especialmente beneficioso para las explotaciones agrícolas en zonas de clima cálido y ante las olas de calor extremo [70]. De esta forma, los beneficios del sombreado parcial sobre el cultivo se potencian en caso de sequía por lo que algunos autores afirman que la agrivoltaica puede fortalecer al sector agrícola frente al cambio climático [43,54,70]. Asimismo, se ha comprobado que los paneles fotovoltaicos en instalaciones agrivoltaicas elevadas pueden sustituir a los plásticos y las redes antigranizo en las explotaciones hortícolas, protegiendo al cultivo de fenómenos climatológicos adversos [43,68]. Por tanto, el sistema fotovoltaico debe favorecer, en la medida de lo posible, el crecimiento del cultivo, permitiendo que éste reciba la irradiancia solar suficiente, a la vez que le ofrece protección.

De acuerdo con esto y teniendo en cuenta que las sombras del cultivo sobre los colectores solares también afectan a la producción eléctrica, a la hora de diseñar un sistema agrivoltaico, es indispensable tener en cuenta la interacción entre ambos sistemas productivos. Por un lado, el cultivo seleccionado, sus características y comportamiento y la maquinaria necesaria para su explotación, condicionan el diseño de la instalación fotovoltaica (altura de módulos, separación de filas de módulos, densidad de módulos, material semiconductor, etc.) [69]. Por otra parte, una vez implementada la instalación fotovoltaica y durante su vida útil, esta condiciona el cultivo a explotar en el terreno, limitando posibles cambios [43].

Por ello, las diferentes tipologías de instalación agrivoltaica deben ser contempladas desde la perspectiva de las variables climáticas que influyen directamente en su desempeño, entre las que cabe señalar: la radiación solar, la temperatura ambiente, la evapotranspiración y la humedad en el suelo. En los siguientes epígrafes se recopilan los principales estudios encontrados en la literatura científica sobre el comportamiento de estas variables agroclimáticas en instalaciones agrivoltaicas.

3.1.1. Radiación Solar

Por lo que respecta a la **radiación solar**, en una instalación agrivoltaica el cultivo y los paneles fotovoltaicos deben compartir la radiación solar disponible que influye directamente en

ambas producciones. Por tanto, el rendimiento de una instalación agrivoltaica depende en gran medida de una integración correcta y equilibrada entre los dos modelos productivos. En este sentido, si bien las condiciones de sombreado parcial e irradiancia incidente sobre el cultivo se pueden variar en función del diseño de la planta fotovoltaica (densidad de paneles, altura y orientación de los mismos o separación entre filas de colectores) [54,70,82], dado que estas variables de diseño también afectan a la producción energética, conviene analizar en detalle aquella configuración que optimiza la producción combinada agrícola y energética de la planta agrivoltaica. Por ello, es fundamental estudiar la interacción e interrelación entre la radiación solar y los sistemas productivos agrícola y fotovoltaico [43].

Concretamente, la gestión de la disponibilidad de la radiación solar se realiza mediante el estudio geométrico de la disposición de los módulos respecto de la zona cultivada, teniendo en cuenta tanto los parámetros de reducción de la radiación solar por el sombreado de los colectores, como la homogeneidad de la radiación incidente sobre el cultivo, ya que conviene que la irradiancia incidente sea homogénea para que el crecimiento y maduración del cultivo sea uniforme. Por lo que respecta al porcentaje de sombreado, se puede establecer como principio general para cualquier tipología de instalación que la disminución de la tasa radiativa es mayor conforme crece el índice Ground Cover Ratio (GCR), esto es, el cociente entre la superficie de colectores solares y la superficie total del terreno donde se encuentra la instalación. Por otra parte, la uniformidad de incidencia radiativa depende de la distancia media entre la zona cultivada y los colectores solares. Para los casos en que los colectores se sitúan sobre el cultivo, con un valor de GCR normalmente comprendido entre 0,2 y 0,4, a mayor altura, mayor homogeneidad radiativa (sin afectar a la bajada de radiación).

De acuerdo con estos principios generales, Trommsdorff et al. [43] proponen los siguientes métodos de gestión de la luz en plantas agrivoltaicas (Figura 7):

- **Desviar las filas de módulos fotovoltaicos respecto a su orientación óptima.** Concretamente, para plantas en el hemisferio Norte cuya orientación óptima es el Sur geográfico, se propone desviarlas hacia el este; mientras que, para instalaciones en el hemisferio Sur, con orientación óptima al Norte geográfico, se propone desviarlos hacia el oeste. De esta forma, se consigue un patrón de sombreado más homogéneo sin repercutir significativamente en la producción eléctrica, tal y como comprobaron Trommsdorff et al. [83] que registraron una reducción inferior al 5% al aplicar esta metodología.
- **Usar módulos más pequeños que minimicen las sombras,** tal y como es común hacer en Japón [48].
- **Usar módulos de doble cara de vidrio semitransparentes** que permiten mantener niveles de luz adecuados incluso con mayor densidad de paneles, lo cual es especialmente útil en explotaciones agrivoltaicas de hortalizas en las que los paneles fotovoltaicos protegen al cultivo.
- **Disponer las filas de colectores solares con orientación de eje Norte-Sur con una distribución espacial en la que la anchura de las filas entre colectores sea mucho menor que la altura de las estructuras que sustentan los paneles.** Esta medida podría complementarse con el uso de seguidores cuya estrategia de seguimiento permita ajustar las condiciones de irradiancia incidente a las necesidades del cultivo.
- **Distribuir los paneles favoreciendo con una mayor distancia entre los módulos fotovoltaicos** [83].

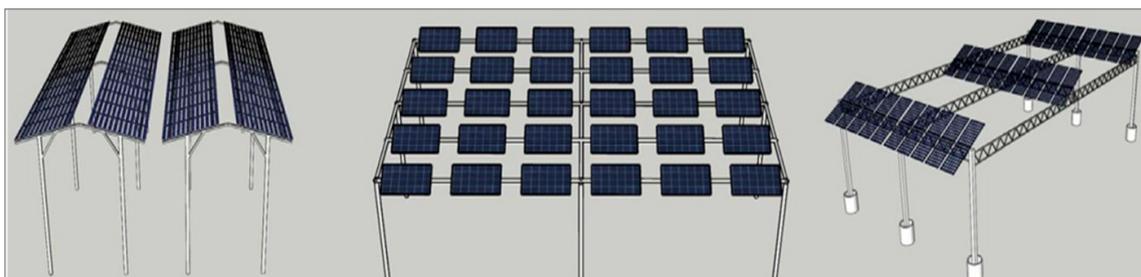


Figura 7. Estrategias de gestión de irradiancia solar incidente en plantas agrivoltaicas [43].

En todo caso, resulta fundamental estudiar la disponibilidad de recurso solar fruto de la interacción entre los colectores solares y el cultivo. En este sentido, Akira Nagashima sugiere un método simplificado para aproximar el índice de sombreado como la relación entre la superficie del módulo y el área total del cultivo [48]. Frente a este modelo simplificado, otros autores simulan mediante modelos físicos, astronómicos y atmosféricos el comportamiento de cada una de las componentes de la irradiancia en el plano de cultivo, mediante la proyección de los rayos solares en el caso de la componente directa y mediante modelos del factor de visión y de la esfera celeste para las componentes difusa y reflejada [59,84]. Así, Pulido-Mancebo et al. [59] presentan un método numérico que permite estimar la distribución de la irradiancia solar en instalaciones agrivoltaicas, teniendo en cuenta la geometría del movimiento astronómico Tierra-Sol y de la planta agrivoltaica, tanto en sus componentes agrícolas como fotovoltaica. Por otra parte, Casares et al. [74] consideran plantas agrivoltaicas con paneles fotovoltaicos con seguidores a un eje N-S y cultivo arbóreo en seto entre las calles de los colectores y simulan el comportamiento de las sombras en estos sistemas. Como resultado, demuestran que existe un espacio geométrico en el que los cultivos no sombrearían a los colectores solares y, consecuentemente, no influirían en la producción energética. Asimismo, proponen una estrategia de retroseguimiento para los colectores solares que minimiza las pérdidas de producción energética en el caso de que el cultivo sobrepase dicha región de no interferencia. Sin embargo, es necesario seguir profundizando en el estudio del aprovechamiento del recurso solar en plantas agrivoltaicas y de su reparto entre los dos sistemas productivos que se combinan.

Como alternativa a estos modelos físicos, otros autores recomiendan el uso de programas informáticos específicos para el estudio del sombreado y de su homogeneidad y del porcentaje de radiación radiativa. Así, por ejemplo, en el marco del programa de fomento de energías renovables SMART del estado de Massachussets (EEUU), el Massachussets Department of Energy Resources ha desarrollado un software intuitivo y de fácil manejo para determinar estas variables [85] (Figura 8). De hecho, los beneficiarios de ayudas a instalaciones agrivoltaicas en el estado de Massachussets están obligados a demostrar, mediante su uso, que durante la época de cultivo la radiación solar no decae más del 40% en ningún punto del terreno. Como alternativa, Fatnassi et al. [76] utilizan como software de cálculo radiativo el módulo Solar Load Model disponible en Ansys Fluent y Beck et al. [86] recomiendan el uso del software Radiance [87] para la obtención de mapas de sombreado.

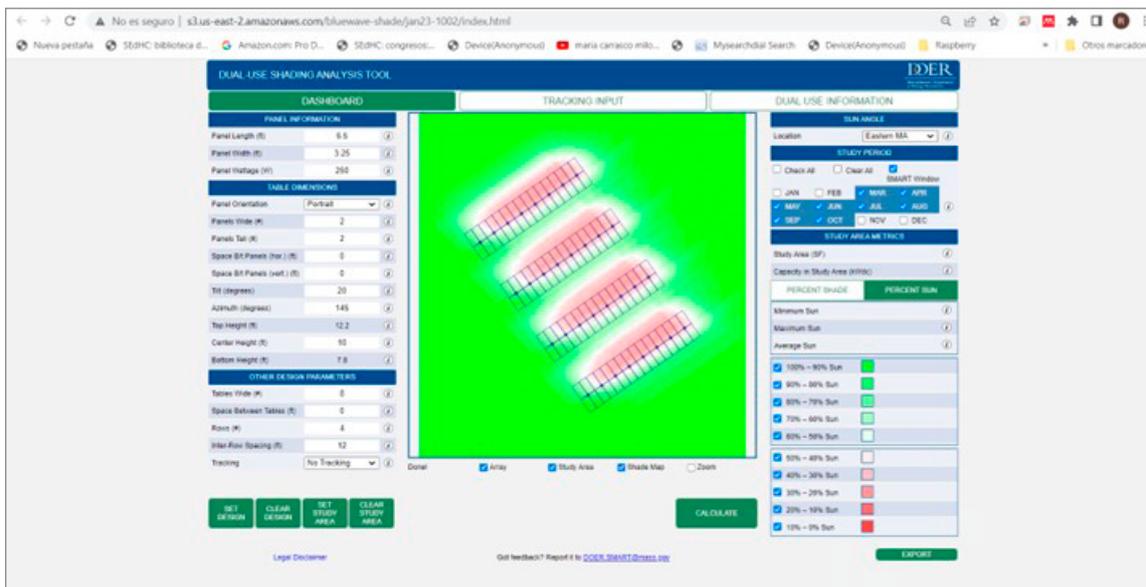


Figura 8. Interfaz de usuario de Bluewave-Shade [85].

La determinación del decaimiento radiativo en los diferentes puntos de la zona de cultivo permite estimar el decaimiento en la incidencia de radiación fotosintéticamente activa (PAR) directamente relacionada con la producción agrícola. Una aproximación grosera establece que el 45% de la radiación global es fotosintéticamente activa [88]. Frente a esta estimación, modelos como el de Oliphant & Stoy [89] permiten obtener estimaciones más precisas de la radiación PAR. A partir de la estimación de la radiación fotosintéticamente activa, es posible utilizar diferentes modelos de crecimiento de cultivo para poder estimar, a priori, la producción de los mismos [83].

Por otra parte, como se dijo anteriormente, en los invernaderos agrivoltaicos también resulta fundamental conocer la distribución de la radiación solar disponible. En esta línea, algunos autores han aplicado simulaciones numéricas para evaluar la influencia del sombreado adicional de los módulos fotovoltaicos en el microclima del invernadero fotovoltaico en términos de radiación solar, temperatura y flujo de aire para días específicos de verano e invierno [76,90]. Concretamente, Yano et al. [91] propusieron un procedimiento basado en ecuaciones para calcular la radiación solar que incide en un punto específico ubicado dentro de un invernadero fotovoltaico con una tasa de cobertura del 12,9 %, comparando el patrón de instalación en línea recta y en damero de los paneles fotovoltaicos en el techo. Asimismo, Castellano et al. [92] calcularon la distribución de la radiación solar dentro de un invernadero con diferentes patrones de instalación fotovoltaica y relación de cobertura del techo en días específicos, utilizando el software Autodesk® Ecotect® Analysis. En dicho trabajo la variabilidad de la distribución de la sombra se calcula como porcentaje de sombra, y cambia de acuerdo con la posición del sol, las configuraciones de los paneles fotovoltaicos en el techo y las zonas consideradas dentro del invernadero. En este sentido, Teitel et al. [93] han comprobado, mediante enfoques geoestadísticos para evaluar la variabilidad de la distribución espacial térmica, que los resultados de los modelos de crecimiento de cultivos no pueden generalizarse para toda el área del invernadero debido a la variabilidad de los patrones microclimáticos.

Por otra parte, utilizando el software TRNSYS (Transient System Simulation Tool), Carlini et al. [94] han simulado la evolución de la temperatura y la humedad dentro de los invernaderos fotovoltaicos, encontrando que la temperatura nocturna de invierno en el interior del invernadero experimenta una caída repentina hasta la temperatura ambiente, mientras que la temperatura de verano es demasiado alta para los cultivos [94]. También, mediante el software TRNSYS, se han evaluado los sistemas solares de calentamiento de agua para el control del microclima de invernaderos, para calcular la productividad de la matriz fotovoltaica y para analizar los parámetros ambientales dentro de un prototipo de invernadero equipado con paneles fotovoltaicos semitransparentes y sistemas de cultivo vertical para agricultura urbana [95,96].

3.1.2. Temperatura Ambiente en la zona de Cultivo

Si bien es conocido el efecto que la sombra causa sobre los microclimas en las zonas de cultivo, son pocos los estudios que se encuentran para cuantificar dicha variación. En este aspecto, destaca el estudio realizado por Armstrong et al. [97] para caracterizar los cambios en el microclima y sus efectos sobre la composición de una misma pradera. Para ello, seleccionaron una planta fotovoltaica de colectores fijos en hileras Este-Oeste en Reino Unido y distinguieron tres zonas: bajo colectores, calles entre colectores y zona testigo exenta de planta fotovoltaica. A partir de dicho estudio pudieron determinar el comportamiento característico de las temperaturas de suelo y aéreas en las tres zonas, distinguiendo un comportamiento diferente en los meses de verano y de invierno. Concretamente, en verano, la temperatura de suelo de la zona testigo exenta de colectores fotovoltaicos y de la zona de las calles entre colectores es muy similar. Sin embargo, en la zona sombreada siempre es más baja (aproximadamente 5°C). Asimismo, la oscilación térmica diaria es más baja en la zona bajo colectores que en las zonas de calle y testigo. En cuanto a la temperatura del aire, la evolución diaria de los valores típicos de verano es muy similar, si bien se observa que en la zona bajo módulos la temperatura es más baja que las de las otras zonas durante el día, aunque durante la noche esta temperatura supera a las de las zonas entre calles y testigo. Por lo que respecta al invierno, la temperatura de suelo bajo colectores se mantiene en su evolución diaria 1,7°C por encima de la temperatura entre calles o en la zona exenta de instalación fotovoltaica, siendo inapreciables las diferencias de temperatura entre estas dos zonas. La temperatura del aire, sin embargo, evoluciona de igual manera en los días de invierno independientemente de la zona. Como consecuencia de este comportamiento de la temperatura y de las diferencias de los microclimas, las especies que componen la pradera presentan diferentes proporciones en cada una de las zonas. Concretamente, algunas especies desaparecieron totalmente de la masa vegetal en la zona bajo colectores.

Por su parte, Marrou et al. [79] realizaron un ensayo agrivoltaico con cultivo bajo estructura elevada para monitorizar los cambios microclimáticos. Para ello, registraron datos de: temperatura de suelo (entre 5 cm y 25 cm de profundidad), temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación incidente. El estudio se realizó paralelamente en un cultivo convencional sin colectores solares y en dos sistemas agrivoltaicos elevados con diferentes densidades de cobertura de módulos diferentes: FD (Full Density) o densidad óptima para una planta exclusivamente fotovoltaica y HD (Half Density) que corresponde con una densidad de cobertura del 50% de FD. Como conclusiones, se comprobó que la temperatura y la humedad medias diarias del aire fueron similares en los tratamientos de pleno sol (testigo)

y en las situaciones agrivoltaicas, independientemente de la estación climática. Por el contrario, la temperatura media diaria del suelo disminuyó significativamente por debajo de los colectores solares en comparación con el tratamiento a pleno sol. Asimismo, se observó que la relación entre la temperatura del cultivo y la radiación solar incidente fue mayor por debajo de los módulos en la mañana. Esto podría deberse a un descenso de las pérdidas de calor sensible por parte de las plantas (ausencia de depósito de rocío a primera hora de la mañana o reducción de la transpiración) en la sombra en comparación con el tratamiento a pleno sol. Sin embargo, se encontró que la temperatura media diaria del cultivo no cambió significativamente a la sombra y la tasa de crecimiento fue similar en todos los tratamientos. Las diferencias significativas en la tasa de emisión de hojas se midieron solo durante la fase juvenil (tres semanas después de la siembra) en lechugas y pepinos y podrían deberse a cambios en la temperatura del suelo. Como conclusión, este estudio sugiere que se requieren pocas adaptaciones en las prácticas de cultivo para cambiar de un sistema de cultivo abierto a un sistema de cultivo agrivoltaico y que la atención debe centrarse en mitigar la reducción de la luz y en la selección de plantas con una eficiencia máxima en el uso de la radiación en estas condiciones de sombra fluctuante.

Finalmente, estos autores [79] señalan la capacidad de la sombra para proteger los cultivos de las subidas térmicas en olas de calor y sus consecuentes incrementos de necesidades hídricas. Durante el ensayo realizado en la estación experimental de Pugère (PACA, Francia) por el INRAe en árboles frutales bajo sombra, se registró un mantenimiento de las temperaturas frescas durante el día (con valores medios de descenso de -2 a -4°C). También se constató un efecto de protección contra heladas primaverales (gracias a un incremento térmico nocturno de $+0,5^{\circ}\text{C}$), así como un descenso significativo de la demanda de agua durante la ola de calor acaecida en julio de 2019. Este efecto de protección de los cultivos es discutido en el trabajo de Armstrong et al. [97] en el que se sugiere que la menor temperatura en las zonas protegidas por los módulos es un factor de disminución de la productividad de las plantas en latitudes más altas, como en el Reino Unido.

3.1.3. Evapotranspiración

Como se ha especificado en los párrafos anteriores, la presencia de módulos fotovoltaicos influye en la radiación y la temperatura que, a su vez, influyen fuertemente en la evapotranspiración o cantidad de agua evaporada a nivel del suelo, transpirada por el cultivo. Actualmente, la ecuación de Penmann-Monteith para la estimación de la evapotranspiración de referencia es universalmente aceptada [98]. Según este modelo la evapotranspiración de referencia depende de la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire y la velocidad de viento. La ecuación marca incrementos de la evapotranspiración proporcionales a los incrementos de radiación, así como una dependencia de la temperatura ambiente en tanto que, conforme ésta crece, aumenta el déficit de vapor en el aire.

Marrou et al. [65], a partir de un estudio sobre horticultura bajo sombras fijas, muestran que la evapotranspiración se reduce entre un 10 y un 30 % con decrementos radiativos que oscilan entre el 50 y el 70 % respecto de la radiación en suelos sin sombreado. La Figura 9, muestra los valores de ET_0 o evapotranspiración de referencia diaria en primavera y verano. En ella se observa que la evapotranspiración de referencia en el terreno totalmente cubierto (puntos en negro) es del orden del 60% de los valores en terreno sin sombra (Full Sun-FS) mientras

que se aprecia una mayor proximidad de los valores en el terreno con sombreado intermedio (HD) a los valores del terreno con sombreado total (FD). A la vista de la Figura 9, se entiende que reducciones en las necesidades hídricas del orden del 20% pueden ser muy habituales en sistemas agrivoltaicos con sombreado lo cual puede resultar beneficioso especialmente en períodos cálidos y secos.

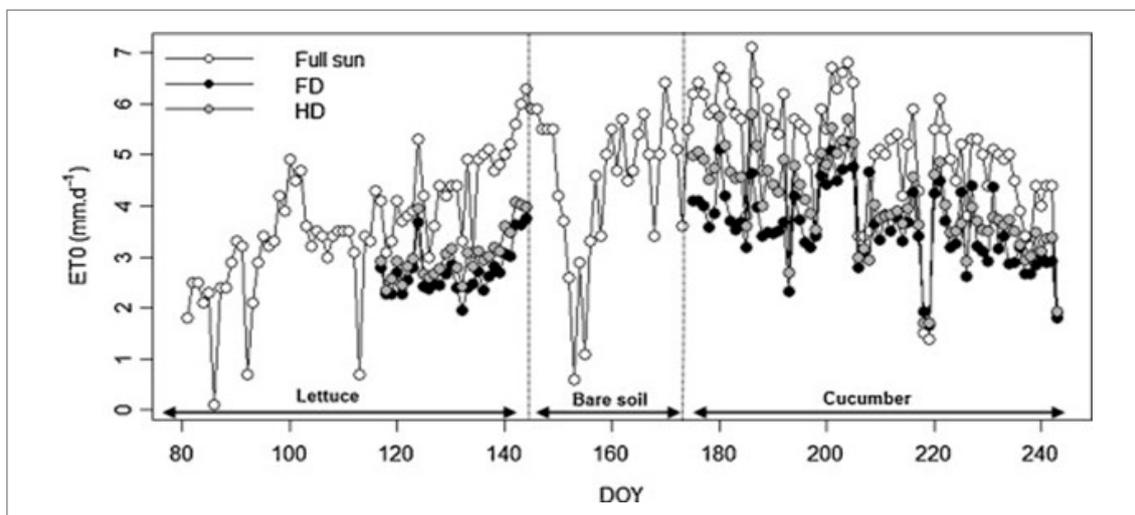


Figura 9 Estimaciones de la evapotranspiración potencial en función encada una de las zonas en ensayo [99].

3.1.4. Manejo de la Precipitación y Riego

La cobertura de suelo por parte de los módulos de una instalación agrivoltaica influirá en el modo en que la precipitación incide en el terreno. La información disponible en la literatura sobre los impactos de los módulos en la distribución del agua y la erosión es relativamente limitada y no es fácil comparar los resultados ya que los ensayos están enmarcados en lugares de climas y condicionantes diferentes.

Así, bajo la hipótesis de que los colectores solares modifican la distribución espacial y cuantitativa de los componentes del balance hídrico del suelo, Feistel et al. [100] han analizado la influencia de los módulos en el equilibrio del flujo de agua, comparando cualitativamente (tamaño y ubicación de las flechas) una situación con módulos y sin ellos (Figura 10).

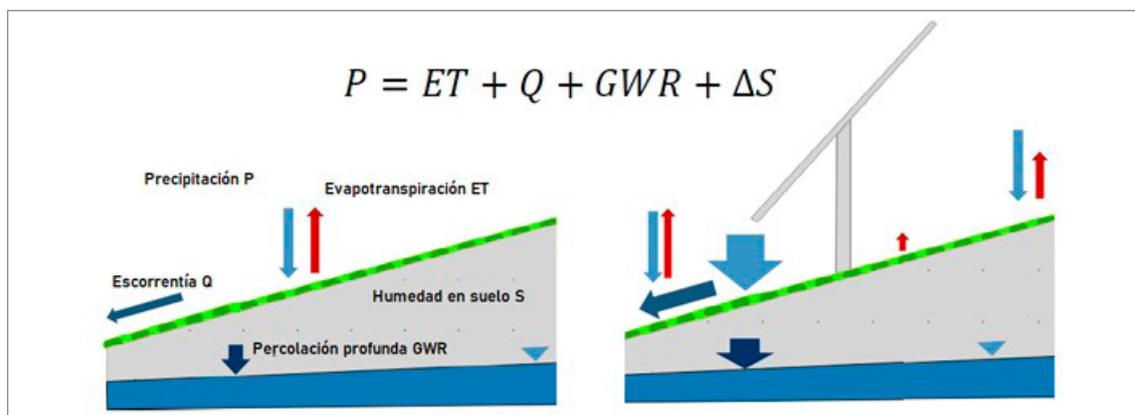


Figura 10. Cambios cualitativos en los flujos que componen el balance de agua en el suelo [100].

El estudio destaca que, debido a las sombras, hay una reducción en la evaporación, siendo este proceso dominante en los meses de verano. También, la precipitación concentrada en la arista inferior de los colectores conduce a una mayor infiltración, filtración y recarga de aguas subterráneas, siendo este último un proceso dominante en los meses de invierno. Asimismo, se comprueba que la infiltración será más intensa en las zonas de desagüe, pudiéndose saturar los suelos y comenzar la escorrentía. En función de la intensidad de precipitación, existirá un determinado riesgo de erosión y formación de cárcavas. En todo caso se recomienda un estudio hidrológico que permita la adecuación de desagües.

En este punto se ha de señalar que, en la mayor parte de instalaciones fotovoltaicas, entre los módulos que conforman un colector, normalmente se deja un espacio vacío de 4 cm. Este espacio, que pretende limitar las cargas de viento extremo en el plano de colectores implica, normalmente, que las superficies impermeables coincidan con el tamaño del módulo fotovoltaico. Así, dependiendo de la estructura de los módulos y su estanqueidad, la distribución del agua en el suelo puede ser muy diferente de una instalación a otra. La heterogeneidad espacial de la distribución de agua en el suelo debajo de los módulos es generalmente significativa y depende mucho de la altura y la geometría de la estructura fotovoltaica.

A título de trabajo hidrológico ejemplar, se presenta el desarrollado por Elamri et al. [55]. Este tipo de estudios se hace necesario para las diferentes instalaciones agrivoltaicas y combinaciones de suelos y climas. Elamri et al. [55] desarrollaron un estudio exhaustivo sobre la distribución de la precipitación, cuando esta se altera por la disposición de módulos fotovoltaicos en altura. Para ello midieron en diferentes ensayos la distribución de precipitación en el terreno y la influencia del ángulo de los seguidores solares elevados sobre esta distribución (Figura 11). De esta forma, identificaron tres zonas en el terreno [101]:

- Áreas no afectadas por la existencia de módulos;
- Áreas protegidas bajo módulos que reciben menos precipitaciones;
- Las zonas de borde de goteo ubicadas debajo de la zona de flujo de agua del módulo, que reciben precipitación de alta intensidad.

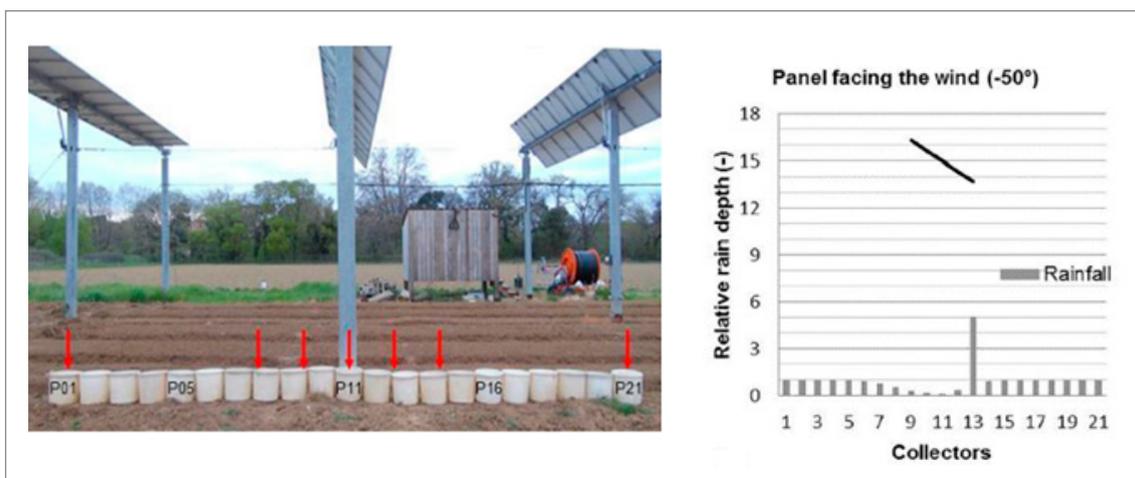


Figura 11. Distribución de pluviómetros en la instalación experimental de Elamri et al. [55]

Además, determinaron la influencia de la geometría de la estructura sobre la distribución espacial de precipitación, cuantificada mediante el coeficiente de variación. Asimismo, simularon la infiltración en el perfil de suelo en función de diferentes estrategias de posicionamiento de los seguidores cuando ocurre la precipitación. La Figura 12 muestra gráficamente los resultados de dicha simulación evidenciándose fuertes contrastes en la distribución del agua en el suelo para el posicionamiento de seguidores en posición fija y con posición optimizada.

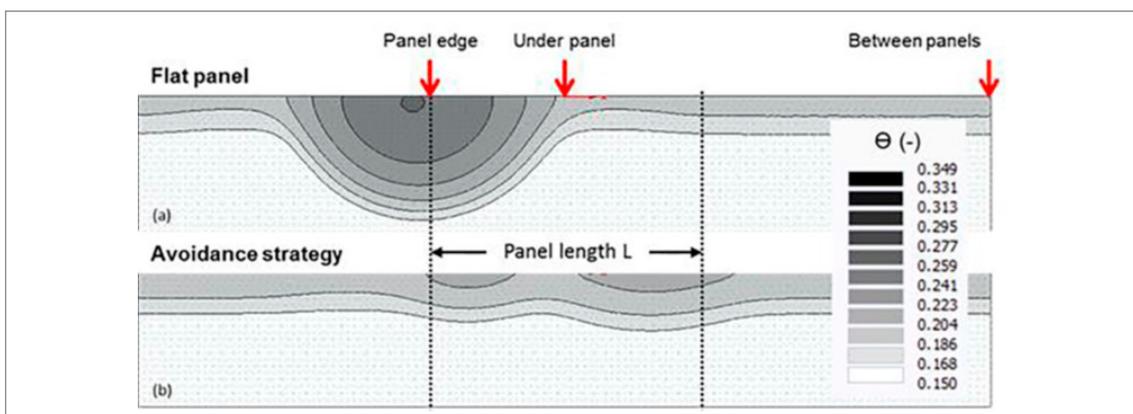


Figura 12. Simulación de patrones de distribución de agua en el suelo, en tres zonas y 2 configuraciones: (a) panel plano y (b) estrategia de control de módulos para reducir la heterogeneidad de las precipitaciones [101].

Por otra parte, Hassanpour [102] monitorizó la evolución temporal de la humedad de suelo a diferentes profundidades distinguiendo tres zonas de una planta agrivoltaica de aprovechamiento de pastos en Oregón (clima semiárido, con inviernos húmedos y veranos secos) con colectores fijos Este-Oeste. La Figura 13 muestra los perfiles tipo de humedad en el suelo en dos épocas del año. En ella se comprueba una mayor conservación de humedad conforme crece el grado de sombra.

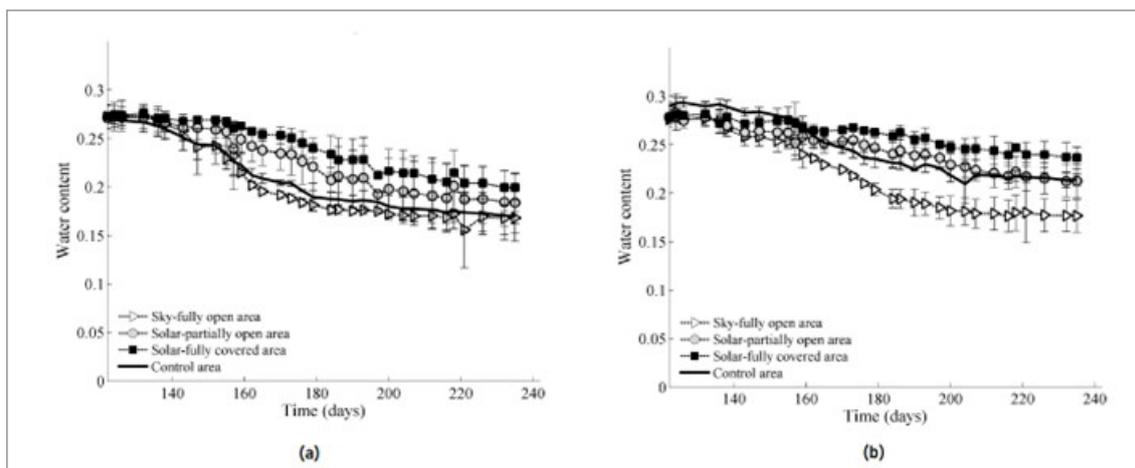


Figura 13. Evolución temporal de la humedad de suelo: (a) a 20cm de profundidad y (b) a 40cm de profundidad [102].

En consonancia con lo expuesto, se constata que la presencia de módulos también reduce mucho la evapotranspiración, a tal punto que se observa una ganancia de hasta un 90% en la productividad del pasto bajo la planta fotovoltaica respecto al testigo (Figura 14), lo cual

se consigue mejorando la eficiencia del uso del agua bajo áreas sombreadas. Finalmente, en consonancia con Armstrong et al. [97], los autores señalan una disminución de la diversidad florística bajo los módulos.

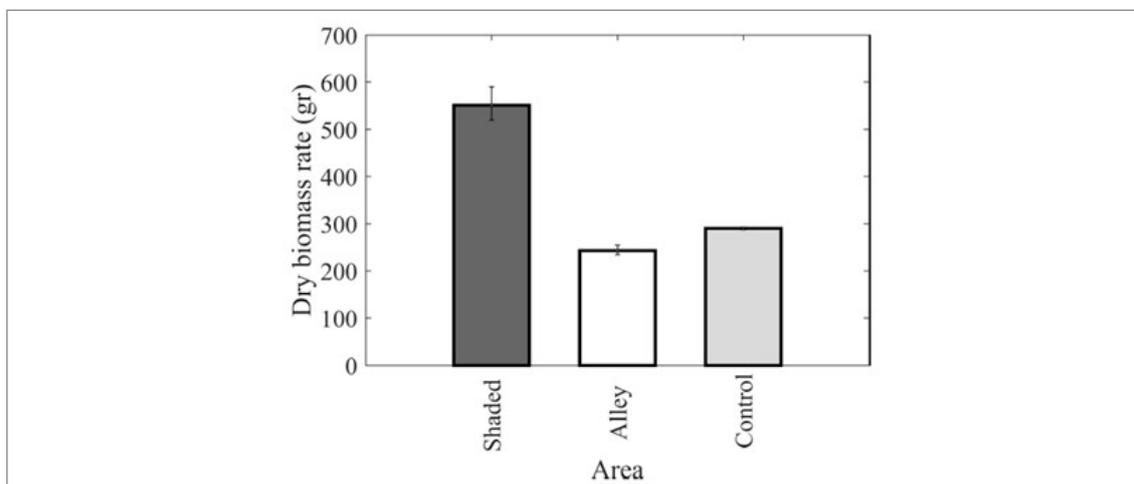


Figura 14. Producción anual de biomasa seca por metro cuadrado en cada una de las zonas.

3.2. Cultivos Agrivoltaicos: Potencial y Principales Requerimientos

El principal y más obvio impacto sobre el cultivo de un sistema agrivoltaico es la disminución de los niveles de irradiación solar que este recibe al ser bloqueada por la acción de los paneles fotovoltaicos. Sin embargo, en contra de lo que inicialmente se podría pensar, el carácter de esta influencia no siempre es negativo, sino que los cultivos reaccionan de diferente manera ante esta reducción de la irradiación solar [43]. Y es que esta reacción depende fundamentalmente de la luz que cada cultivo necesita para la fotosíntesis, la cual viene representada por la correspondiente curva de respuesta fotosintética a la luz. La Figura 15 muestra la curva de respuesta fotosintética a la luz de un cultivo genérico. En ella se observa que, una vez superado el punto de compensación de la luz para el cual se inicia la fotosíntesis, la velocidad de esta aumenta linealmente con la intensidad de la luz que recibe la planta o más concretamente de su componente fotosintéticamente activa (PAR) correspondiente a las longitudes de onda entre 400 a 700 nm. Sin embargo, a partir de una determinada intensidad de la luz, la velocidad de la fotosíntesis tiende a estabilizarse. El punto para el que este hecho ocurre se denomina **punto de saturación de la luz** y es específico para cada especie. A partir de ese punto, mayores niveles de radiación solar no se traducen en mayores tasas de fotosíntesis y, consecuentemente, no afecta a las tasas de desarrollo y crecimiento del cultivo [103]. Se deduce de esto que, cuanto más bajo sea el punto de saturación de la luz de un cultivo, más tolerante será a la sombra.

Por tanto, ajustando adecuadamente la sombra que proporcionan los paneles fotovoltaicos con el punto de saturación de la luz del cultivo, en principio y desde un punto de vista teórico, cualquier cultivo podría implementarse en un sistema agrivoltaico siempre que no existan otros factores limitantes [43]. De esta forma, aunque algunos cultivos muestran reducciones de rendimiento en sistemas agrivoltaicos debido a la reducción de luz [104], otros cultivos pueden adaptarse de manera que las pérdidas de rendimiento sean bajas o nulas [105].

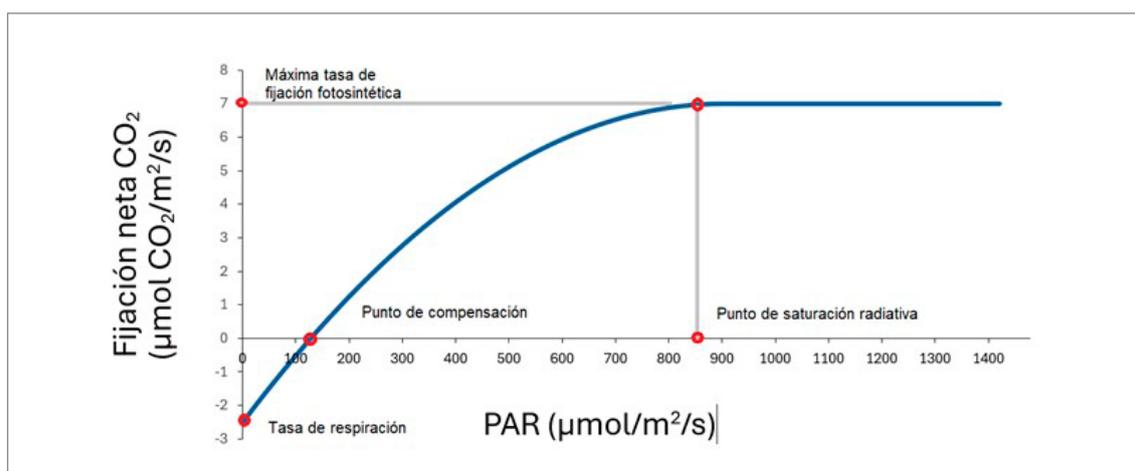


Figura 15. Curva de respuesta fotosintética a la luz de un cultivo genérico.

De acuerdo con esto, para diseñar sistemas agrivoltaicos exprofeso o que se implementan a partir de explotaciones agrícolas previas en las que se incorpora un sistema fotovoltaico, el punto de saturación de la luz del cultivo determina la proporción de sombra que puede recibir dicho cultivo y, consecuentemente, la configuración del sistema fotovoltaico. Análogamente, para diseñar un sistema de reconversión de una instalación fotovoltaica preexistente en la que se incorpora un cultivo, la elección de este estará condicionada por el correspondiente punto de saturación de la luz. En cualquier caso, al margen de los ingresos adicionales de la fotovoltaica, la tolerancia a la sombra del cultivo es esencial para determinar el resultado económico de una instalación agrivoltaica [106].

Diferentes estudios han identificado cultivos que, en determinadas circunstancias, se consideran adecuados para su cultivo en sistemas agrivoltaicos. Así, por ejemplo, investigadores del "Center for Agriculture, Food, and the Environment" de la Universidad de Massachusetts Amherst [107–109] proponen como cultivos más adecuados para la agrivoltaica aquellos cultivos de clima templado más tolerantes a la sombra como las verduras (lechuga, espinaca, col rizada, acelga, mostaza), algunas hierbas aromáticas (perejil, menta, cilantro), Brassicas (brócoli, coliflor, repollo, coles de Bruselas), guisantes, habas, puerros y cebollas. Asimismo, en base a su bajo punto de saturación de la luz, estos autores predicen que el arándano puede tener un buen comportamiento en sistemas agrivoltaicos con una tasa de sombreado adecuada, así como algunas hortalizas de raíz (zanahorias, remolachas, colinabos, patatas, rábanos), si bien es esperable que su periodo de crecimiento se ralentice y sea más largo que a pleno sol. Sin embargo, afirman que las hortalizas amantes del sol como los tomates, los pimientos, las berenjenas, el maíz, los pepinos y las calabazas podrían verse afectadas negativamente si se plantan en zonas muy sombreadas por lo que, en caso de introducirlas en sistemas agrivoltaicos, convendría hacerlo en las zonas menos sombreadas [108]. No obstante, por lo que respecta a los tomates, Barron-Gafford et al. [81] comprobaron que, incluso con altas tasas de sombreado (70-80%), el rendimiento del cultivo del tomate Cherry y del pimiento Chiltepin aumenta significativamente (Tomate Cherry: +90%; pimiento Chiltepin: +150%).

Por otra parte, Kumpanalaisatit et al. [61] plantaron chilis bajo los paneles de una planta fotovoltaica y analizaron experimentalmente la evolución de la luz solar incidente en el cultivo, la temperatura del aire y de los paneles y las variables eléctricas de los paneles (voltaje e

intensidad), concluyendo que la planta agrivoltaica podía tener un rendimiento energético y agrícola adecuado.

Marrou et al. [65,79] compararon el comportamiento de tres cultivos (lechuga, pepinos y trigo) en tres configuraciones diferentes: cultivo tradicional, planta agrivoltaica con una instalación fotovoltaica convencional (densidad de paneles del 100%) y planta agrivoltaica con una instalación fotovoltaica reducida con densidad de paneles del 50%. A partir de este estudio comprobaron que las tasas de crecimiento de los cultivos en plantas con densidad de paneles solares del 50% era similar a la de los cultivos tradicionales en los que la incidencia solar no encuentra obstáculos en el camino [65]. Según los autores, esto se debe, en parte, a que la temperatura y la humedad relativa del aire es similar en ambas configuraciones, aunque la temperatura del terreno era menor en el caso de cultivos bajo colectores solares como consecuencia de una menor incidencia de la radiación solar, que es bloqueada por los colectores solares. Asimismo, comprobaron que en el caso de la lechuga el rendimiento del cultivo no se ve perjudicado por la influencia de los colectores solares. De hecho, para contrarrestar los efectos negativos de la sombra, la lechuga aumenta su superficie foliar y, al ser precisamente su hoja la parte de la planta que se aprovecha como alimento, este cultivo resulta especialmente interesante en sistemas agrivoltaicos [79]. También Valle et al. [72] cultivaron lechugas bajo paneles fotovoltaicos fijos y con seguimiento solar y encontraron que el comportamiento del cultivo era similar al de una plantación de lechugas convencional.

Por lo que respecta a los frutales, tal y como se ha comentado antes, se ha comprobado que algunas frutas especialmente sensibles a los fenómenos climatológicos extremos, como las bayas, se comportan bien en los sistemas agrivoltaicos gracias a la protección de las estructuras fotovoltaicas de manera que el beneficio aportado como refugio puede superar a los inconvenientes derivados de las sombras de los paneles fotovoltaicos [43].



Figura 16. Planta agrivoltaica Sun'Agri en Francia [110]

Otro de los cultivos que puede verse beneficiado por la protección de los colectores solares elevados frente a una incidencia solar es la vid (Figura 16). Los efectos del cambio climático sobre la climatología están dando lugar al aceleramiento del desarrollo fenológico de las vides, provocando que su fruto madure en pleno verano bajo condiciones más cálidas y secas [111,112]. Sin embargo, el calor y la radiación solar excesivos repercuten negativamente sobre el cultivo, pudiendo provocar quemaduras solares o incluso que se seque su fruto [113]. Además, la radiación solar afecta al contenido de azúcar en las uvas, disminuyendo la calidad del vino [114,115].

Diversos autores están investigando sobre el posible uso de tecnologías como la nebulización o las redes de sombreado para paliar los efectos del cambio climático en la producción vitícola [116,117]. Sin embargo, la agrivoltaica puede constituirse como una mejor solución alternativa, ya que ofrece al cultivo la protección que necesita, frenando la aceleración fenológica y mejorando las condiciones de maduración, a la vez que se consigue generación de energía eléctrica renovable.

En esta línea, Tiffon-Terrade et al. [118] y Cho et al. [119] encontraron que el sombreado de los paneles fotovoltaicos sobre la vid, puede retrasar la maduración del cultivo hacia un periodo más fresco repercutiendo positivamente en la calidad del fruto. Asimismo, Malu et al. [45] implementaron en India una planta agrivoltaica en la que se cultivaba viña en las calles entre paneles fijos de una planta fotovoltaica y encontraron que el valor económico del viñedo aumentaba un 15% respecto al de un viñedo tradicional. En esta misma línea, Tiffon-Terrade et al. [120] demostraron que el rendimiento del cultivo de vid con un porcentaje de sombreado del 36% aumenta hasta un 25 %, si bien para un porcentaje de sombreado del 66 % dicho rendimiento disminuye. Otra de las ventajas del cultivo agrivoltaico de la vid radica en el hecho de que, dada la altura típica de la vid, las estructuras elevadas en este tipo de cultivo pueden diseñarse con una altura de entre 2-3 metros reduciendo significativamente los costes de las mismas [43].

Finalmente, se ha comprobado que los beneficios de la agrivoltaica son especialmente reseñables en circunstancias climatológicas extremas. Concretamente, Weselek et al. [70] comprobaron que durante el verano de 2018, especialmente seco y caluroso, el rendimiento de varios cultivos aumentó (trigo +3%, patata +11% y apio +12%), a pesar de que esos mismos cultivos habían visto disminuir su rendimiento como consecuencia de las sombras de los paneles en la cosecha del año anterior en el que no estuvieron sometidos a condiciones extremas (trigo -19%, patata -18% y apio -19%). Esto se debe a que, en ausencia de otros factores limitantes, para niveles de irradiación solar por debajo del punto de saturación lumínica, como se ha dicho antes, el rendimiento del cultivo disminuye. Sin embargo, cuando existen otros factores limitantes, como altas temperaturas o falta de agua, los cultivos se ven beneficiados por la sombra de los paneles. Por ello, se considera que la agrivoltaica puede fortalecer al sector agrícola frente a las consecuencias negativas derivadas del cambio climático [43,54,70].

En el ámbito de los cultivos en invernaderos agrivoltaicos, López Díaz et al. [77] han estudiado el cultivo de tomate en un invernadero con orientación N-S situado en Almería para distintas tasas de cobertura fotovoltaica (0%, 15%, 33% y 50%). Los resultados de este estudio evidencian que porcentajes de sombra superiores al 15% reducen en exceso la radiación solar disponible en el interior del invernadero y, como consecuencia, la producción se retasa hacia el final de la temporada y el rendimiento y la calidad del tomate (número y tamaño de los frutos) se ven afectadas negativamente.

Otro trabajo experimental a destacar en el ámbito de la agrivoltaica en invernaderos es el desarrollado por Teitel et al. [121]. En este trabajo se dispusieron dos túneles altos similares con su eje orientado N-S. Uno de los túneles, considerado como túnel de control, se cubrió únicamente con una lámina de polietileno en 2018 y con una lámina de polietileno con una pantalla de sombra negra (25 % de sombra) en 2019. El segundo túnel (en adelante, túnel OPV), se cubrió con la lámina de polietileno y módulos fotovoltaicos orgánicos flexibles semitransparentes. Debido a la baja transmitancia de los módulos OPV (~20 %) en el rango de radiación fotosintéticamente activa (PAR), solo se cubrió el 37 % del área del techo para evitar sombreado excesivo. Concretamente, los módulos se dispusieron a lo largo del arco del techo del túnel en bandas de 1 m de ancho y aproximadamente 6,4 m de longitud con espacios de 1 m entre tiras adyacentes. Se pudo comprobar que las plantas en el túnel OPV tenían un índice de área foliar más alto que las del túnel de control en 2018 y similar en 2019. A pesar de la menor intensidad promedio de radiación en el túnel OPV en comparación con el de control (en 2018), el rendimiento acumulado en el primero fue generalmente más alto que en el de control, con una masa de fruta promedio más alta (101 g vs. 81 g, respectivamente), aparentemente debido a la temperatura más baja del dosel. En 2019, el rendimiento acumulado en los túneles OPV y de control fue generalmente casi el mismo [121].

Finalmente, cabe destacar el proyecto de investigación REGACE sobre agrivoltaica en invernaderos desarrollado en Israel en el marco del cual se ha instalado en seis invernaderos un sistema de seguimiento fotovoltaico que consta de módulos fotovoltaicos bifaciales semitransparentes y que ha sido especialmente diseñado para optimizar la distribución de la luz en el interior de los invernaderos agrivoltaicos, a la vez que maximizar la producción fotovoltaica.



**Figura 17. Proyecto Regace:
Seguidores solares sombreadores
en interior de invernadero [122]**

A modo de resumen, la Tabla 2 presenta una revisión sistemática de los resultados encontrados en la literatura científica sobre los cultivos agrivoltaicos analizados empíricamente.

TABLA 2. Revisión sistemática de estudios empíricos sobre rendimiento de cultivos en explotaciones agrivoltaicas

CULTIVO	VARIEDAD	EMPLAZAMIENTO	TASA DE SOMBREO	VARIACIÓN DE RENDIMIENTO	REF
LECHUGA	--	Santiago, Chile	30%	-8%	[123]
	Kiritabi y Madelona	Montpellier, France	50% de densidad de colectores solares (con seguimiento solar)	Entre -5 % y -30% Las pérdidas disminuyen con seguimiento solar que favorezca al cultivo	[72]
	--	Montpellier, France	50 % de densidad de colectores solares	Entre - 1 % y -19 %	[65]
			100 % de densidad de colectores solares	Entre - 21 % y -42 %	[65]
	--	Japón	50%	Entre - 10 % y -40 % (dependiendo de la estación)	[124]
COL	--	Massachusetts, USA	38%	-30%	[107,109]
COL RIZADA	--	South Deerfield, Massachusetts, USA	38%	+ 25 % (2016, con verano cálido y seco) - 50 % (2017, con verano frío) - 45 % (2018)	[107,109]
BROCCOLI	--	Santiago, Chile	30%	-29%	[123]
	--	Massachusetts, USA	38%	+ 40 % (2016, con verano cálido y seco) - 40 % (2017, con verano frío) - 45 % (2018)	[107,109]
ACELGAS	Acelga suiza	South Deerfield, Massachusetts, USA	38%	+ 70% (2016, con verano cálido y seco) - 25% (2017, con verano frío) - 60% (2018)	[107,109]
JUDÍA	--	South Deerfield, Massachusetts, USA	38%	+ 350 % (2016, con verano cálido y seco) - 65% (2017, con verano frío)	[107,109]
APIO	--	Heggelbach, Germany	35%	- 19 % (2017) +12 % (2018, con verano especialmente caluroso)	[70]

CULTIVO	VARIEDAD	EMPLAZAMIENTO	TASA DE SOMBREO	VARIACIÓN DE RENDIMIENTO	REF
TRIGO	--	Heggelbach, Alemania	35%	- 19 % (2017) +3 % (2018, con verano especialmente caluroso)	[70]
	--	Lieja, Bélgica	Tasa de reducción de radiación global recibida: 6-14%	-4%	[125]
			Tasa de reducción de radiación global recibida: 35-55%	-25%	
MAÍZ	--	Kyoto, Japón	Densidad baja	+ 4,9 %	[126]
			Densidad alta	- 3,1 %	
	Híbrido Pioneer 3780A	Ontario, Estados Unidos	50%	-12/-20/-20% ¹	[127]
ARROZ	--	Chiba, Japón	20 %	- 20%	[80]
		Joydebpur, Bangladesh	22/52/77%	-18,6/-32,5/-46.9%	[128]
PATATAS	--	Heggelbach, Germany	35%	- 18 % (2017) +11 % (2018, con verano especialmente caluroso)	[70]
		Kalpitiya, Sri Lanka	50%	+20%	[129]
TRÉBOL	--	Heggelbach, Alemania	35%	- 5 % (2017) - 8 % (2018, con verano especialmente caluroso)	[70]
PIMIENTO CHILE	Chiltepin	Tucson, Arizona, USA	70%-80%	150%	[81]
	Jalapeño	Tucson, Arizona, USA	70%-80%	-15%	
PIMIENTO MORRÓN	--	Massachusetts, USA	38%	+ 40 % (2016, con verano cálido y seco) - 40 % (2017, con verano frío) - 70 % (2018)	[107,109]
VIÑA		Piolenc, France	36%	+ 25 %	[120]
			66%	- 25%	

1. Los tres valores de reducción del rendimiento corresponden a la época en que se aplicó el sombreado; crecimiento vegetativo, floración y llenado de grano respectivamente.

CULTIVO	VARIEDAD	EMPLAZAMIENTO	TASA DE SOMBREO	VARIACIÓN DE RENDIMIENTO	REF
TOMATE	Cherry	Tucson, Arizona, USA	70%-80%	90%	[81]
	Strain β	El Kanatir, Egipto	35/55/63%	136/127/42% (1988)	[130]
	Peto 86			74,5/55/18,6% (1989)	
GIRASOL		Buenos Aires, Argentina	20%	-33,30%	[131]
ALGODÓN		Nanjing, China	21/38%	-20/33% (2010)	[132]
				-17/31% (2011)	

Del análisis de la Tabla 2 se deriva que no es posible identificar cultivos óptimos para plantas agrivoltaicas a nivel global, ya que el rendimiento de la producción agrícola depende de las condiciones geográficas y climatológicas del emplazamiento donde se sitúe la instalación. Además, dada la novedad de este modelo productivo, no existen investigaciones empíricas suficientes, ni consolidadas en el tiempo sobre el rendimiento de los cultivos agrivoltaicos ni bajo condiciones de sombra en general [133]. Es, por tanto, necesario continuar trabajando en esta línea de caracterización del comportamiento empírico de cultivos agrivoltaicos. No obstante, en términos generales, se observa que el rendimiento de cultivo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sombra o la densidad de colectores solares, por lo que, como ya se dijo antes, es necesario encontrar un equilibrio entre producción fotovoltaica y agrivoltaica. Por otra parte, se observa que la producción agrícola en una misma instalación y para un mismo cultivo, aumenta en años especialmente secos y calurosos. Como consecuencia, se puede esperar que la agrivoltaica resulte especialmente beneficiosa en climas cálidos y secos como el mediterráneo, propio de algunas zonas de nuestro país, así como para aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático [43,54,70].

De esta forma, más allá de las ventajas medioambientales y sociales, aunque los sistemas agrivoltaicos son más caros que los sistemas fotovoltaicos convencionales, la valoración global de los mismos será positiva si se consigue que tengan rendimientos agrícolas razonables que puedan, además, compensarse con los ingresos por la venta de la electricidad generada [49].

4. TECNOLOGÍAS FOTOVOLTAICAS APLICADAS A LA AGRIVOLTAICA

La tecnología para el desarrollo de instalaciones agrivoltaicas parte del conjunto de soluciones fotovoltaicas, si bien cada vez más se aprecia una cierta especialización en el mercado tecnológico con soluciones dedicadas expreso al uso dual del terreno. En este epígrafe se describen las más relevantes.

4.1. Inteligencia Artificial y Software

Las PYMES Ingeniería y Desarrollos Renovables (INDEREN) [134], Plug and Play Energy, EMIN Energy Management Innovation junto con ETRA Investigación y Desarrollo y el Clúster de Energía de la Comunidad Valenciana (CECV) están desarrollando un proyecto innovador en el ámbito agrivoltaico: SMART CLIMATE AGRI-PV «Investigación y desarrollo de un nuevo sistema de inteligencia artificial y de teledetección basado en drones para la producción climáticamente inteligente de cultivos en sistemas agrovoltaicos» (Figura 18).

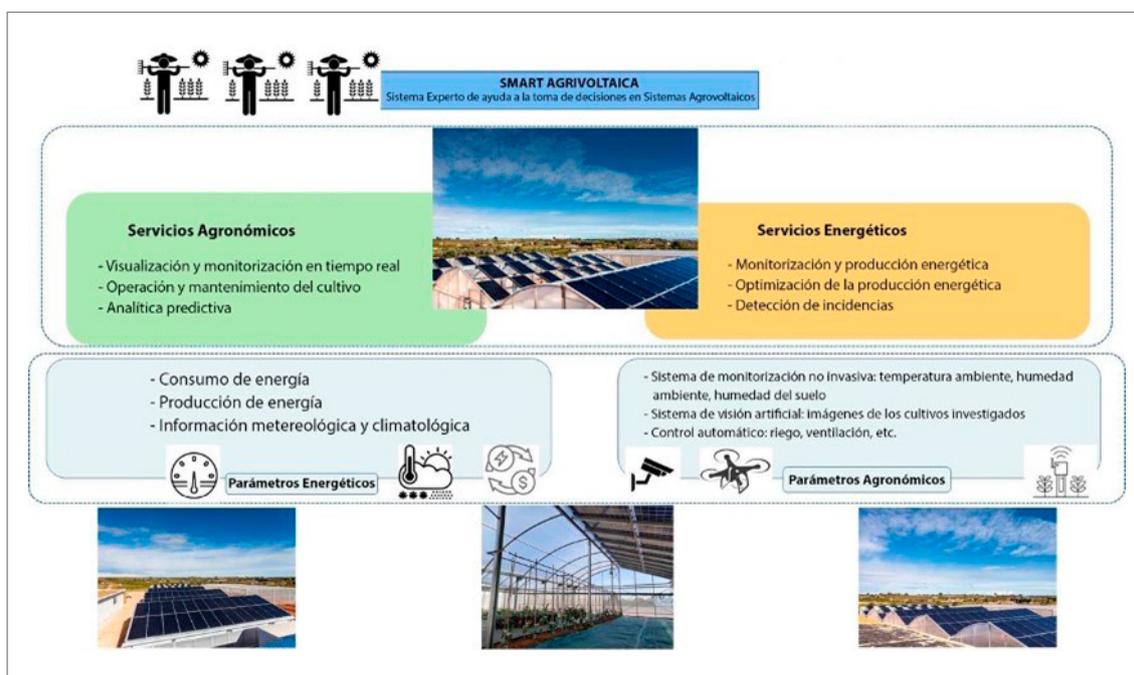


Figura 18. Diagrama de bloques del sistema de gestión inteligente SMART AGRIVOLTAICA [134].

El proyecto se centra en la investigación sobre el desarrollo industrial de nuevos sistemas agrivoltaicos. Para ello, mediante tecnologías innovadoras de la agricultura 4.0 (inteligencia artificial, visión artificial, drones y sensores espectrales) se pretende caracterizar el comportamiento de los cultivos de manera no invasiva y, a partir de este conocimiento, generar modelos matemático-agronómicos para estimar, en tiempo real, las necesidades del cultivo y su nivel de estrés. Con ello, se pretende reducir los costes productivos y optimizar el consumo de agua, fertilizantes y productos fitosanitarios.

Por su parte, las empresas francesas Ombrea y RES se han asociado para desarrollar sistemas fotovoltaicos para sombrear cultivos en proyectos agrivoltaicos [135,136], recreando un microclima adaptado a las necesidades de los cultivos que asegure su buen desarrollo y palíe los riesgos

meteorológicos protegiéndolos de fenómenos climáticos extremos. Para ello, se utilizan módulos fotovoltaicos retractiles y un software de control equipado con tecnologías de inteligencia artificial (IA) que permite anticiparse y reaccionar ante condiciones climáticas desfavorables.

También algunos sistemas de monitoreo 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 [110].

4.2. Materiales: Módulos Solares Semitransparentes

Actualmente, la mayoría de los sistemas fotovoltaicos instalados en sistemas agrivoltaicos utilizan módulos convencionales. Sin embargo, la utilización de estos módulos puede dar lugar a altos niveles de sombra y producir un impacto negativo en el crecimiento de los cultivos. Una solución potencial para este problema es el empleo de módulos fotovoltaicos semitransparentes.

Este tipo de módulos pueden clasificarse en función de sus tecnologías: basadas en c-Si, película delgada, orgánicos y *Dye synthesized solar cells* (DSSc), así como otras tecnologías emergentes específicas para entornos de cultivo. Del estudio de Gorjian et al. [137] cabe destacar que, entre las diferentes tecnologías de módulos semitransparentes, destaca la basada en silicio cristalino (c-Si), que ya se encuentra ampliamente disponible en instalaciones comerciales y de investigación, tanto en invernaderos como en huertos agrivoltaicos. Su bajo costo, estabilidad y alta eficiencia hacen que sea la opción de módulos semitransparentes dominante en el mercado. Dado que las células de silicio cristalino son opacas, la semitransparencia se obtiene interespaciándolas y encapsulándolas en materiales transparentes (Figura 19). Aunque el coste de estos colectores es superior al de los opacos convencionales, con ellos se puede conseguir mejor uniformidad radiativa utilizando estructuras más bajas lo que conlleva un menor LCOE (Coste normalizado de la energía).

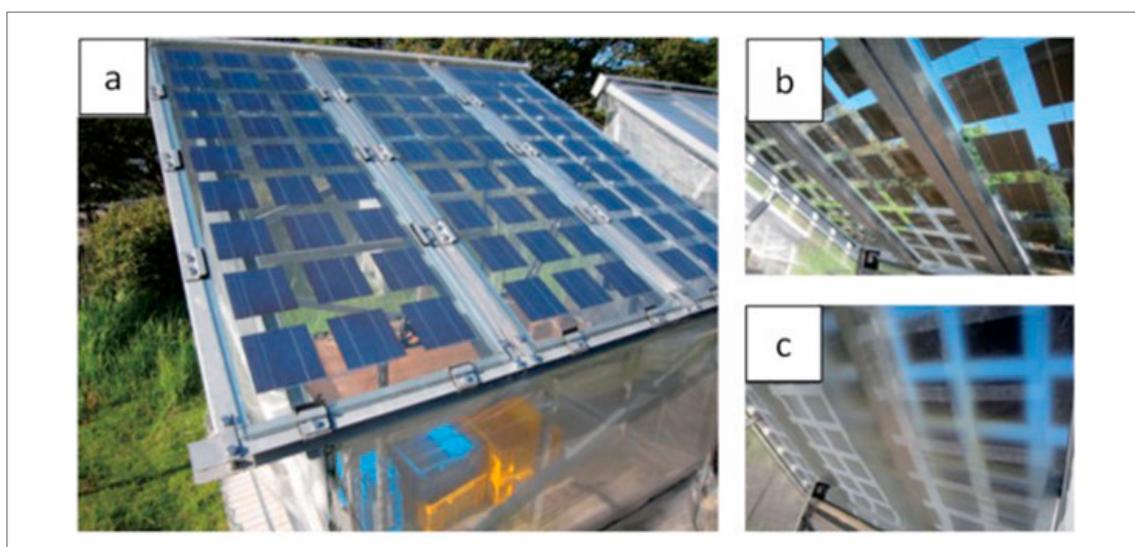


Figura 19. Módulos fotovoltaicos semitransparentes para aplicaciones agrivoltaicas [137].

En esta línea, la empresa alemana BayWa r.e. [138] y su filial holandesa GroenLeven BV han diseñado paneles solares monocristalinos específicos para el 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 disipara el exceso de calor del interior.

Una alternativa diferente para las células de silicio cristalino ha sido desarrollada por SphelarPower que inserta en vidrios células esféricas, de aproximadamente 2 mm de diámetro [139]. La densidad del encapsulado permite obtener mayores potencias de módulo y menor transparencia a la radiación. También se están desarrollando paneles solares para sistemas agrivoltaicos utilizando polímeros semitransparentes que permiten el paso de las longitudes de onda de la radiación solar necesarias para la fotosíntesis mientras absorben el resto para generar energía. Un ejemplo de estos módulos, disponibles comercialmente, son los desarrollados para la tecnología de invernadero por LUMO de Solicultura (Scotts Valley, California) [140]. Estos paneles transparentes integran tiras fotovoltaicas de silicio dispuestas periódicamente dentro de los paneles de vidrio, permitiendo que la luz pase entre las tiras. Una capa delgada de material luminiscente en la parte posterior del vidrio convierte la luz verde en roja. Con ello se consigue favorecer el desarrollo del cultivo a la vez que se aumenta la producción energética. De esta forma, este dispositivo resulta ideal para áreas de cultivo en invernaderos donde se desea máxima transmisión de luz. La Figura 20 muestra el aspecto de un invernadero parcialmente cubierto con este producto [140].



Figura 20. Módulos semitransparentes desarrollados por LUMO [140].

Por otra parte, en febrero de 2022, el fabricante de paneles solares Bisol [141], con sede en Eslovenia, lanzó *Bisol Lumina*, un módulo solar bifacial y semitransparente sobre una matriz de células con espacios más grandes entre las mismas y una tasa de transparencia del 30%, lo que lo hace adecuado para proyectos agrivoltaicos. Se debe tener en cuenta que, al tratarse

de módulos, la producción energética dependerá en gran medida de la reflectancia o albedo del terreno cubierto por estos módulos, pudiendo incrementarse la producción hasta un 70%.

Por su parte, la start-up suiza de tecnología solar INSOLIGHT [142] ha desarrollado módulos basados en la tecnología THEIA (Translucency and High Efficiency in Agrivoltaics) que consiste en una matriz de lentes convergentes que concentran la radiación directa en pequeñas células de heterounión. Así este tipo de módulos aprovechará la radiación directa para producir energía eléctrica mientras que la radiación difusa atravesará el módulo. La Figura 21 muestra el esquema de principio de estos colectores. Este tipo de módulo se han se implementado en una instalación agrivoltaica piloto a gran escala en Valais, Suiza.

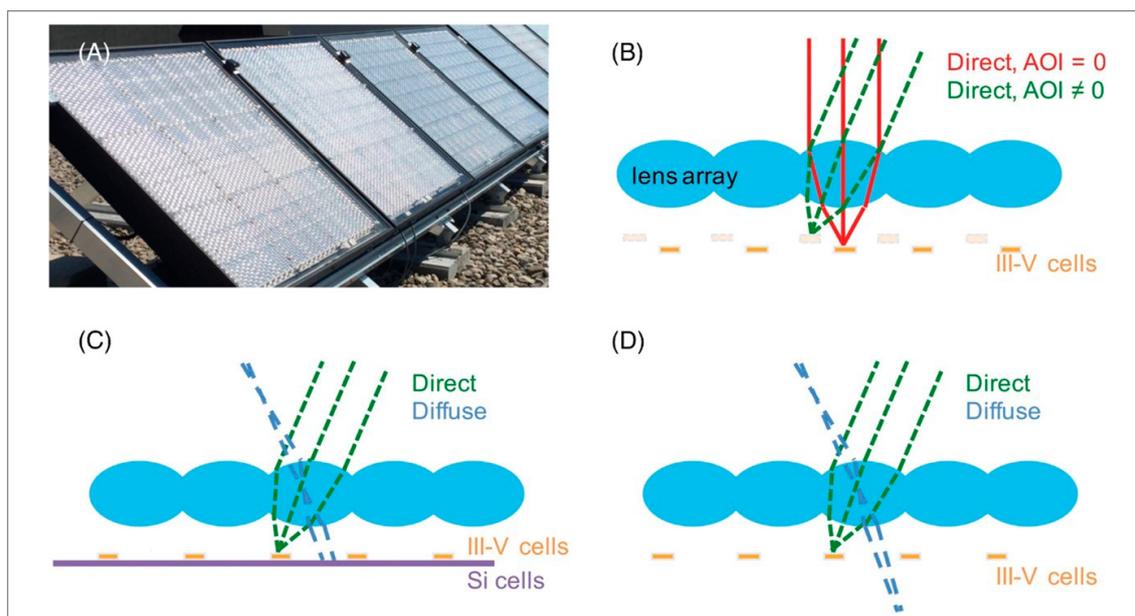


Figura 21. Tecnología THEIA desarrollada por Insolight [143].

Otra opción prometedora la ofrece la tecnología fotovoltaica orgánica (OPV) que ofrece propiedades de absorción personalizadas. Debido a esto, se puede lograr una transparencia selectiva de longitud de onda, lo que también permite una alta transparencia en el espectro solar entre 400 y 700 nm, correspondiente a las longitudes de onda que intervienen en el proceso de la fotosíntesis. La empresa franco-alemana ASCA fabrica y comercializa módulos OPV personalizables y flexibles para aplicaciones de invernadero entre otras [144].

También en el marco de soluciones tecnológicas orientadas a la agrivoltaica, la empresa Irex ha presentado un panel solar consistente en un encapsulado de células vidrio-vidrio antireflectante, sin marco, con 2 metros cuadrados de superficie, 6 mm de grosor y 20 kg de masa [145]. El panel, denominado Irex Agri-PV, tiene una potencia de salida de 265 W con un rendimiento de conversión del 18,1 %.

Finalmente, la empresa alemana TubeSolar 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 [146].

4.3. Estructuras de Montaje y Diseños Optimizados para Sistemas Agrivoltaicos

Como se ha comentado anteriormente, en las instalaciones agrivoltaicas la estructura de soporte de los colectores está condicionada por el cultivo y sus necesidades, siendo necesario diseñarla cuidadosamente para garantizar que no interfiere con las actividades agrícolas, ni reduce el rendimiento de los cultivos. Generalmente, los módulos se instalan a una altura mayor que en la fotovoltaica tradicional y se proyectan con un ancho de calles entre colectores que garantice niveles de luz y precipitaciones adecuados para el cultivo.

En esta línea, en la Universidad de Ciencia y Tecnología de China se ha diseñado una estructura que reduce el efecto de sombreado de los colectores solares, mejorando el proceso de crecimiento de los cultivos y su calidad y rendimiento [147]. Concretamente, la nueva metodología de diseño que proponen, denominada *Even Agrivoltaic System (EAS)* o Sistema Agrivoltaico de Iluminación Uniforme, consta de estructuras de soporte metálicas, paneles solares convencionales y placas de vidrio ranuradas entre los paneles solares que trabajan como difusores de la radiación solar y ocupan un tercio del área receptora de luz de todo el sistema.

Paralelamente, diferentes fabricantes también están diseñando sistemas de montaje para instalaciones agrivoltaicos. Por ejemplo, Solasol [148] y Sunfer [149] están comercializando estructuras de pérgola prefabricadas para proyectos agrivoltaicos aplicables a diferentes cultivos. MetalFrame Renovables [150] y Sunsupport [151] fabrican estructuras agrivoltaicas exprofeso que permiten obtener diferentes niveles de transmisión de luz, satisfaciendo las necesidades de diferentes cultivos y adaptándose a distintos diseños agrivoltaicos. Voestalpine Sade AG [152], con sede en Bélgica, comercializa dos sistemas de montaje para plantas agrivoltaicas: FlexAgri Fruit y Flex-Agri Vertical. FlexAgri Fruit es una estructura de dosel, sostenida por perfiles de acero que cubre los árboles frutales para ofrecer la máxima protección y servir como estructura de montaje para paneles solares. FlexAgri Vertical es una estructura de acero para soportar los paneles solares bifaciales verticales.



Figura 22. Sistema soporte para sistemas agrivoltaicos verticales de Next2Sun [153].

Siguiendo este último planteamiento, Next2Sun AG ha desarrollado y patentado un sistema de estructura de acero (Figura 22) para instalaciones agrivoltaicas que minimiza el sombreado de los módulos sobre el cultivo: Next2Sun Mounting Systems [153]. El sistema consta de dos postes y tres vigas que soportan dos módulos bifaciales de encapsulado vidrio-vidrio en vertical. La altura total del marco es adaptable si bien generalmente se asienta alrededor de tres metros sobre el suelo. De esta forma, estos sistemas de colectores solares bifaciales verticales se integran en el modelo de agrivoltaica interespacial en filas paralelas entre sí y orientadas frecuentemente en dirección este-oeste [154].



Figura 23. Plantas agrivoltaicas verticales: ancho interespacial entre colectores solares compatible con labores agrícola [153].

Así, con una distancia adecuada entre las filas de colectores que permita el paso de la maquinaria agrícola (Figura 23), el terreno se aprovecha mejor para el cultivo a la vez que los colectores protegen al cultivo del viento. Sin embargo, en esta configuración, la generación de electricidad puede verse reducida ya que se producirá principalmente durante las primeras y últimas horas del día solar, siendo significativamente menor o casi nula en las horas centrales del día. Por ello, es necesario evaluar el comportamiento y rendimiento de estos sistemas agrivoltaicos, para evaluar la rentabilidad de la inversión.

En esta misma línea de uso de paneles fotovoltaicos verticales, la empresa Next2Sun también ofrece un vallado fotovoltaico para fincas agrícolas (Figura 24). De esta forma, mediante esta solución tecnológica, se incorpora la producción eléctrica renovable mediante colectores solares distribuidos en el perímetro del terreno de cultivo. Sin embargo, en este modelo la integración de los sistemas agrícola y fotovoltaico es menor, y, por tanto, la interacción y sinergias entre los mismos también lo serán. Como consecuencia, es posible que no se beneficien de la influencia mutua de los sistemas y el beneficio de la agrivoltaica sobre ambas producciones quede mermado.



Figura 24. Vallado fotovoltaico [153].

Finalmente, por lo que respecta a las cimentaciones de las estructuras soporte de los paneles fotovoltaicos, la empresa Spinankers [155] ha desarrollado un sistema de cimentación sin hormigón (Figura 25) [156]. El sistema se basa en un cabezal de acero que se fija al suelo mediante trefilados de acero clavados en distintas direcciones. De este modo se emula el sistema radical de un árbol. El sistema presenta la ventaja de que puede ser íntegramente retirado del campo de cultivo. Este sistema ha sido empleado, por ejemplo, en la instalación de Haggelbach (Alemania). Además, empresas como Ecoresystems [157] o TRAMAT [158] ofrecen cimentaciones atornilladas, basadas en pilotes de tornillo (Figura 26). Se trata de soluciones recomendables por su facilidad de montaje y desmontaje. Aunque puedan parecer menos robustas que las de hormigón, los pilotes atornillados ofrecen diversas ventajas: a) No requieren excavación; b) Permiten una instalación rápida; c) Ofrecen mayor estabilidad ante movimientos del suelo; d) Tienen una huella ecológica mínima, y e) Son extraíbles y reutilizables.

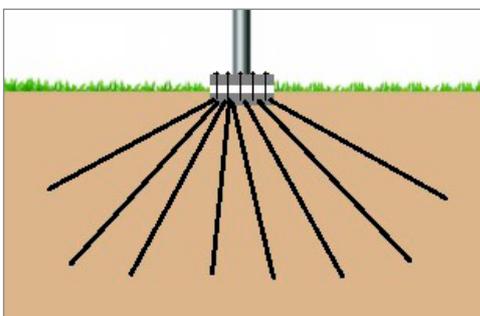


Figura 25. Diagrama de principio de las cimentaciones sin hormigón Spinanker.



Figura 26. Diagrama de principio de las cimentaciones atornilladas.

4.4. Diseño de Seguidores Solares Optimizados para Sistemas Agrivoltaicos

Si bien las primeras investigaciones en agrivoltaica se limitaban a instalaciones fotovoltaicas con paneles fijos [79], recientemente se vienen analizando otros diseños con seguidores solares, principalmente a un eje [54,55,70–73,99], ya que se ha comprobado que, de esta forma, no sólo se mejora la producción energética de la planta fotovoltaica [72] sino también la producción agrícola del cultivo [71–73,99]. En concreto, el uso de paneles fotovoltaicos móviles se puede aprovechar para mejorar la distribución de la lluvia en los cultivos bajo los paneles [55] así como para aumentar la incidencia solar en las horas extremas del día y reducir las altas temperaturas al medio día [72].

Consecuentemente, varias empresas han desarrollado nuevos sistemas de seguimiento solar específicos para sistema agrivoltaicos. Concretamente, la empresa española Axial Structural, [159], fabricante de sistemas de estructuras de fijación de módulos, ha desarrollado Agritracker, un seguidor solar diseñado específicamente para instalaciones agrivoltaicas. El seguidor admite hasta 96 módulos por motor y filas independientes de hasta 32 módulos, divididos en cuatro grupos de ocho paneles cada uno. Además, se pueden instalar a una altura de hasta 6,8 metros permitiendo el paso de maquinaria agrícola pesada por debajo. De esta forma, el sistema puede acomodarse a cultivos con diferentes requisitos de luz y altura (vid, árboles frutales y hortalizas, por ejemplo), protegiéndolo de las inclemencias del tiempo y permitiendo una fácil optimización de los períodos de luz y sombra para equilibrar el crecimiento óptimo de diferentes tipos de cultivos con la máxima generación de energía. Además, la solución tecnológica propuesta puede adaptarse a terrenos inclinados tanto con pendientes muy pronunciadas como variables.

Por su parte, Mechatron Solar (Stockton, CA) [160], desarrollador internacional de proyectos solares comerciales e industriales que fabrica sus propios seguidores fotovoltaicos de doble eje exclusivos y patentados, ha desarrollado el modelo M18kd para aplicaciones agrivoltaicas. El dispositivo se compone de una plataforma con 9 paneles de ancho y 10 paneles de alto, colocados en retícula, con un espacio adicional de 10 pulgadas entre los módulos fotovoltaicos, para permitir que llegue más luz a los cultivos bajo el seguidor. De acuerdo con esta configuración, el seguidor mueve un generador fotovoltaico de hasta 33,6 kW utilizando módulos de 420 W. El borde inferior de la plataforma del panel se mueve a una altura de entre 1m y 3m sobre el suelo y el borde superior de la mesa del panel se mueve a una altura de sobre suelo comprendida entre 3 y 10m.

5. ESTUDIOS DE RENTABILIDAD: INDICADORES

5.1. Evaluación de Costes de las diferentes tipologías de Sistemas Agrivoltaicos

Siendo en el momento actual los costes de inversión (CAPEX) de instalación uno de las mayores limitantes para la implantación de las plantas agrivoltaicas, resulta necesario ahondar en la estructura de costes de los diferentes sistemas agrivoltaicos. Sin embargo, la falta de desarrollo del sector agrivoltaico en España hace que no se encuentren proveedores especializados, lo que dificulta la posibilidad de obtener presupuestos ajustados a las condiciones locales. Por ello, resulta aún muy difícil cuantificar los costes de las soluciones

estándar. Ante esta situación en este informe se exponen los resultados de dos estudios científicos con alto índice de citas que valoran económicamente las tipologías agrivoltaicas básicas: agrivoltaica elevada, vertical e interespacial:

- Scharf, J., Grieb, M., & Fritz, M. (2021). Agri-Photovoltaik: Stand und offene Fragen. Technologie-und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. [161]
- Horowitz, K., Ramasamy, V., Macknick, J., & Margolis, R. (2020). Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops [162]

A pesar de que se tratan de artículos similares en metodología y referidos en ambos casos a precios de 2020, llegan a valores llamativamente dispares. Como consecuencia, es necesario seguir investigando en el análisis de costes de los sistemas agrivoltaicos, así como ahondar comparativamente en ambos estudios para descubrir el origen de las disimilitudes.

En el primero de estos estudios, Scharf et al. [161] presentan un detallado análisis de costes, desglosado según partidas, en el que se comparan las plantas agrivoltaicas elevadas, con colectores verticales y con seguidores solares, frente a las plantas fotovoltaicas puras montadas sobre el suelo. Como regla general, aunque las cifras del estudio se obtuvieron a partir de datos reales, se han de considerar como orientativas pues, como los propios autores advierten, dichos valores dependerán, entre otras cosas, de la ubicación (y, por tanto, de las condiciones locales), de la capacidad instalada, del tipo de instalación y de la tecnología de los módulos fotovoltaicos seleccionados. Además, en el caso de los sistemas agrivoltaicos, los costos también dependen de la correspondiente gestión agrícola del cultivo, ya que esto puede implicar ciertos requisitos para el diseño del sistema. Los principales resultados de este estudio se sintetizan en la Tabla 3 que recoge los valores económicos de referencia del año 2021 expresados en €/kWp.

TABLA 3. Costes de inversión €/kWp de diferentes diseños de sistemas fotovoltaicos agrícolas en comparación con los sistemas montados en el suelo, tamaño de los gráficos circulares ajustado al monto de la inversión total [161]

	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	1234

En dicho estudio, se utiliza como referencia el coste de una planta fotovoltaica estática convencional sobre suelo. Esta tipología se trata de un diseño muy simple y común en el que los módulos suelen instalarse en una posición fija, con un ángulo de unos 20-30 °. La orientación típica de la instalación varía de Sureste a Sur y Suroeste, según la ubicación. Normalmente se utilizan módulos estándar monocristalinos que, de acuerdo con lo ya dicho, en la actualidad ofrecen una buena relación calidad-precio. En estas plantas los costes de planificación y aprobación vienen a ser constantes con gran independencia del tamaño de la planta. Por ello, su representación porcentual tiende a ser mayor conforme la planta es más pequeña.

Asimismo, en relación a esta evaluación de costes de referencia, los autores señalan el bajo coste de los módulos que representa entre un tercio y la mitad de los costes totales del sistema y que se justifica en base a la caída de precios tan significativa que han experimentado los módulos fotovoltaicos en las últimas dos décadas y que ha supuesto una caída promedio de alrededor de un 80 %, motivada por la evolución del mercado de silicio y el aprendizaje y la economía de escala en la producción de módulos fotovoltaicos.

A partir de estos costes de referencia, los autores presentan un estudio comparativo de los diferentes tipos de sistemas agrivoltaicos cuyos costes de inversión, en general, se comprueban que son superiores a los de las plantas fotovoltaicas de módulos fijos convencionales. Estos costes de adquisición e instalación dependen fundamentalmente de la tecnología del módulo seleccionado y del tipo de estructura, así como del manejo agrícola. En este sentido, el carácter innovador de los sistemas agrivoltaicos dentro del mercado fotovoltaico hace que los desarrollos no estén suficientemente generalizados y experimentados. Además, se recurre tanto a estructuras como módulos específicos que se adapten a la aplicación. Por ello, elementos tales como los módulos y estructuras suelen ser más costosos que los correspondientes a las plantas fotovoltaicas con módulos fijos convencionales. Sin embargo, para los demás elementos (inversores, planificación del proyecto y componentes eléctricos) los costes son comparables a los de una fotovoltaica fija convencional, ya que no es necesario utilizar componentes especiales y los procesos de planificación y aprobación no difieren mucho entre sí. De acuerdo con esto, a continuación, se presentan los principales resultados del análisis comparativo:

- **Sistemas agrivoltaicos verticales:** Los sistemas erigidos verticalmente suelen estar alineados en dirección Norte Sur, con las caras de los colectores orientadas al Este y al Oeste. Como resultado, pueden convertir la radiación solar en electricidad de manera particularmente eficiente en las horas de la mañana y la tarde. Para lograr el mayor rendimiento posible, se utilizan módulos bifaciales. Estos son más costosos que los módulos estándar convencionales, pero brindan una salida adicional en la parte posterior del módulo que puede alcanzar entre el 80-95 % de la salida nominal. Sin embargo, dado que los módulos con una bifacialidad más alta no generan suficiente rendimiento adicional que justifique el aumento de coste, en la práctica, en los sistemas agrivoltaicos se utilizan principalmente módulos con una bifacialidad del 80-85%, cuyo coste medio alcanza los 250 €/kWp (frente a los 220 €/kWp de los módulos convencionales). Asimismo, el coste de los marcos para sistemas verticales es más caro que para los sistemas de montaje estándar (200 €/kWp frente a 75 €/kWp) como consecuencia de ser productos que se fabrican a medida en lugar de producirse en serie.

- **Sistemas fotovoltaicos elevados:** Debido a su diseño, los sistemas elevados conllevan exigencias constructivas especiales. Concretamente, la exposición de grandes superficies al viento a alturas de hasta 6 m conlleva mayores requisitos en la cimentación, repercutiendo en un coste de estructuras significativamente más elevado que en los sistemas convencionales. A título de ejemplo, el coste medio de las estructuras, incluidos los cimientos, se estima en 400 €/kWp, aunque en determinados cultivos más bajos este coste podría reducirse hasta los 130-220 €/kWp. Por lo que respecta a los módulos, el coste de los módulos generalmente instalados en esta tipología de sistema agrivoltaico que se caracterizan por una mayor transparencia que los módulos estándar convencionales, asciende hasta los 330 €/kWp. Asimismo, los costes de preparación e instalación del emplazamiento también son significativamente más altos para esta tipología de agrivoltaica situándose entre 250 y 350 €/kWp, si bien pueden disminuir hasta un intervalo de entre 120 a 180 €/kWp en casos de cultivos especiales en los que la altura pueda reducirse.
- **Sistemas agrivoltaicos con seguidores solares:** En principio, el diseño de estos sistemas apenas difiere del de las plantas fotovoltaicas convencionales con seguimiento solar, salvo por la mayor altura de los seguidores solares que dependerá del cultivo seleccionado. De acuerdo con esto, salvo en los costes de la estructura de montaje, los costes de esta tipología de sistema agrivoltaico son muy similar a los de una planta fotovoltaica convencional con seguimiento solar.

De la aplicación de los resultados de este estudio a una planta agrivoltaica en Althegeenberg, suponiendo que se configura en base a cada una de las tipologías analizadas se obtienen las evaluaciones de costes globales que se recogen en la Tabla 4.

TABLA 4. Análisis comparativo de inversión de una planta agrivoltaica en Althegeenberg de acuerdo con la evaluación de costes propuesta por Scharf et al. [161].

	COSTE TOTAL (€/kWp)	CAPACIDAD PV (kW/ha)	INVERSIÓN NECESARIA (€/ha)
SISTEMA CONVENCIONAL	572	850	486.200
SISTEMA VERTICAL	688	345,8	237.760
ESTRUCTURA ELEVADA- SEGUIDOR	1.234	650	802.100

A modo de conclusión, los investigadores reflejan que los desarrolladores de agrivoltaica corren el riesgo de incurrir en costes de inversión más elevados en caso de que el diseño deba innovar en algún aspecto. Además, el uso de componentes especiales como módulos, sistemas de montaje y seguidores solares puede comprometer significativamente los costes, especialmente, en plantas de módulos elevados para que la maquinaria agrícola pueda operar debajo [161].

A las cautelas ya indicadas por Scharf et al. [161] debemos añadir la derivada de la volatilidad y alta variabilidad de los precios del acero en los mercados internacionales. La Figura 27

muestra cómo el precio del acero, íntimamente correlacionado con la partida de estructura, puede llegar a triplicarse, lo que, junto con el aumento del coste de cimentación, compromete la rentabilidad de las estructuras elevadas [163].

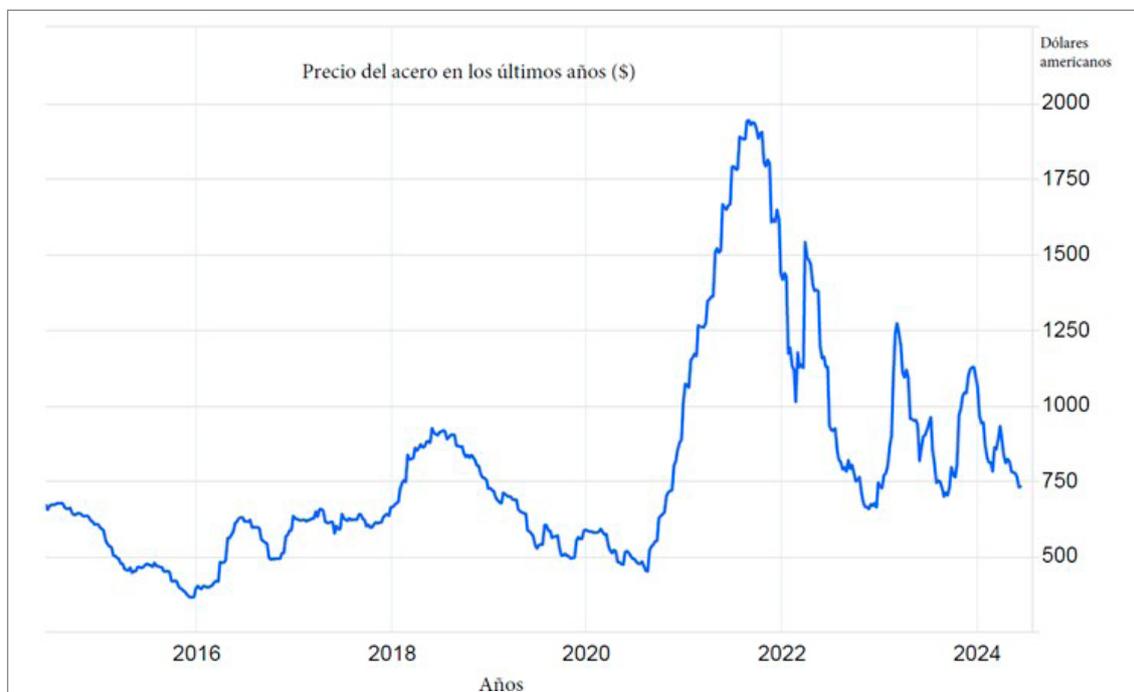


Figura 27. Evolución del precio del acero [163].

Por lo que respecta al segundo estudio sobre evaluación de costes en sistemas agrivoltaicos, los investigadores Horowitz et al. [162], del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de Estados Unidos, evaluaron comparativamente los costes de un sistema de 500 kW adaptado a las siguientes configuraciones (Figura 28):

- Fotovoltaica convencional sobre suelo: En esta categoría se analizan conjuntamente los diseños fotovoltaicos convencionales fijos y con seguimiento a un 1 eje.
- Fotovoltaica + pastos: En esta categoría se combina la configuración de la fotovoltaica convencional (también con colectores solares fijos y con seguimiento a un 1 eje) con cultivo bajo los paneles de pastos para aprovechamiento ganadero o, en algunos casos, con pastos y vegetación favorable a los polinizadores.
- Fotovoltaica + polinizadores: En esta categoría se combina la configuración de la fotovoltaica convencional (con colectores solares fijos y con seguimiento a un 1 eje) con vegetación favorable a los polinizadores bajo los paneles solares.
- Fotovoltaica + cultivos: En esta categoría se consideran a su vez tres diseños: agrivoltaica elevada (d), agrivoltaica vertical con paneles fotovoltaicos bifaciales (e) y agrivoltaica elevada con seguimiento solar. Para todos estos diseños, los cultivos se pueden cultivar debajo y/o entre los paneles a diferentes densidades.

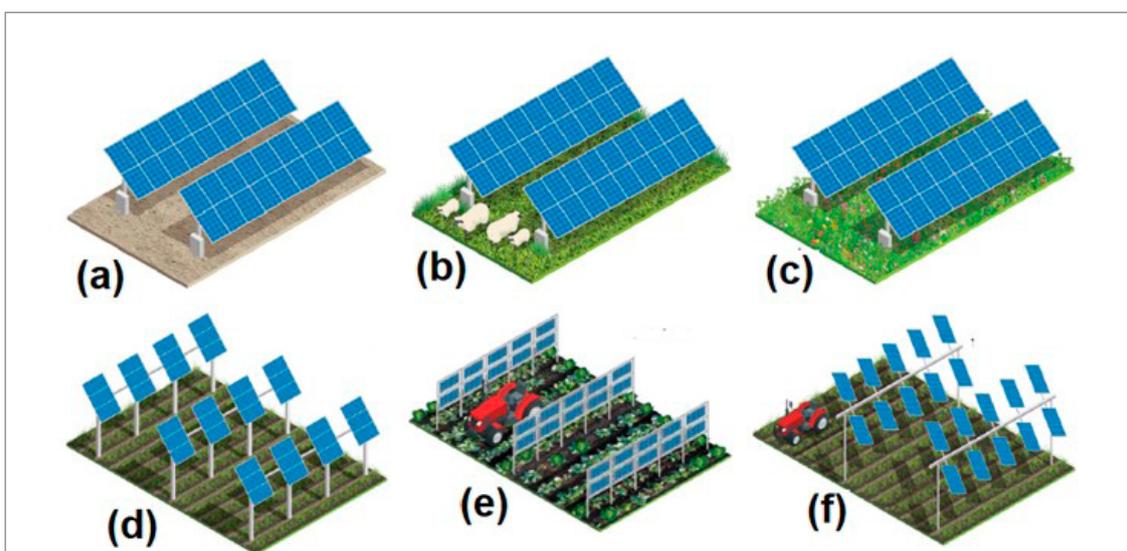


Figura 28. Tipos de instalaciones considerados por Horowitz et al. [162] en su estudio de evaluación de costes: (a) fotovoltaica convencional, (b) fotovoltaica con pastos para ganadería, (c) fotovoltaica sobre vegetación para polinizadores, (d) agrivoltaica elevada, (e) agrivoltaica vertical y (f) agrivoltaica elevada con seguimiento solar.

La Tabla 5 muestra los costes de las instalaciones analizadas en función de la potencia de módulos. En todos los casos, se comprueba que las configuraciones agrivoltaicas llevan asociados unos costes superiores a las que se basan en la fotovoltaica convencional. Se observa que el menor coste (referido a la potencia) corresponde a los sistemas fotovoltaicos combinados con cultivo para pastoreo. Esto se debe a que estos sistemas pueden usar estructuras fotovoltaicas convencionales y no requieren tanta preparación del sitio o siembra, como es el caso de los sistemas fotovoltaicos preparados para insectos polinizadores. Es importante señalar que esta configuración para el cultivo de pastoreo hace referencia al pastoreo de ovejas, por ser actualmente el más común. En el caso de pastoreo de ganado ovino los costes se elevarían ya que sería necesario no sólo elevar sino también reforzar las estructuras soporte de los módulos para evitar roturas derivadas de la costumbre de esta especie de rascarse utilizando paredes y estructuras de su altura.

TABLA 5. Costes (\$/Wp) asociados a los diferentes tipos de instalación consideradas por Horowitz et al. [162]

	TYPICAL FIXED PV	TYPICAL 1-AT PV	FIXED PV+ GRAZING	TRACKER PV+ GRAZING	FIXED PV+ POLLINATOR	TRACKER PV+ POLLINATOR	PV+ CROPS (VERTICAL MOUNT)	PV+CROPS (TRAKER STILT MOUNT)	PV+CROPS (REINFORCED REGULAR MOUNT)
EPC DEVELOPER NET PROFIT	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17
DEVELOPER OVERHEAD	0.15	0.16	0.15	0.17	0.16	0.17	0.18	0.20	0.22
CONTINGENCY (3%)	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07

	TYPICAL FIXED PV	TYPICAL 1-AT PV	FIXED PV+ GRAZING	TRACKER PV+ GRAZING	FIXED PV+ POLLINATOR	TRACKER PV+ POLLINATOR	PV+ CROPS (VERTICAL MOUNT)	PV+CROPS (TRAKER STILT MOUNT)	PV+CROPS (REINFORCED REGULAR MOUNT)
INTERCONNECTION FEE	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
PERMITTING FEE (IF ANY)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
SALE TAX (IF ANY)	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07
EPC OVERHEAD	0.12	0.14	0.13	0.15	0.14	0.16	0.17	0.19	0.25
INSTALL LABOR & EQUIPMENT	0.18	0.21	0.19	0.22	0.23	0.27	0.25	0.22	0.32
ELECTRICAL BOS	0.24	0.24	0.26	0.26	0.24	0.24	0.25	0.27	0.38
STRUCTURAL BOS	0.11	0.16	0.12	0.17	0.12	0.17	0.21	0.40	0.32
INVERTER ONLY	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
MODULE	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
TOTAL	1.53	1.66	1.60	1.73	1.63	1.78	1.83	2.09	2.33

Por el contrario, los costes (por potencia) se elevan al considerar sistemas agrivoltaicos elevados (con y sin seguimiento) debido al coste de las estructuras que soportan los colectores solares a 2,5 m de altura por lo que han de ser reforzadas para mantener la integridad estructural bajo cargas de viento y nieve. Frente a ellos, el sistema de montaje vertical tiene el coste de instalación más bajo entre las configuraciones agrivoltaicas. Sin embargo, la producción eléctrica por vatio nominal podría ser menor debido a la orientación de los paneles. Una menor producción de energía aumenta el costo nivelado de energía (LCOE) y afecta a la economía del sistema. En cualquier caso, Horowitz et al. [162], concluyen que se requiere continuar investigando para optimizar la compensación entre el coste instalado y el LCOE de los sistemas agrivoltaicos.

Finalmente, por lo que respecta a los costes de operación de los sistemas agrivoltaicos, se observa que son variables y difícilmente extrapolables de una explotación a otra. Sin embargo, en términos generales existen mayores ahorros potenciales en los gastos operativos de instalaciones agrivoltaicas que en los sistemas fotovoltaicos convencionales montados en tierra ya que:

1. Los costes de provisión de la tierra, basados en el arrendamiento del terreno, disminuyen al compartirse entre el agricultor y el operador del sistema agrivoltaico. Así, en cultivos herbáceos o permanentes bajan de unos 2 a 1,3 €/kWp mientras que en horticultura bajan a 1,6 €/kWp. Esta cifra puede variar según la estructura de propiedad y el modelo de negocio. Así, los ahorros potenciales pueden ser mayores en la agricultura extensiva porque las tasas de arrendamiento suelen ser más bajas que en la horticultura.
2. Los costos de gestión de la tierra que tradicionalmente asume un operador de sistema fotovoltaico se eliminan mediante el uso agrícola regular.

Sin embargo, es probable que los costos de limpieza o de reparación de los módulos fotovoltaicos sean mayores, más a medida que crece la altura de la instalación y son necesarias plataformas elevadoras. En este sentido, la experiencia con respecto a los efectos a largo plazo de los fertilizantes y productos fitosanitarios en la subestructura y en los módulos fotovoltaicos es limitada desconociéndose si el uso de estos productos implicará mayores costes de mantenimiento.

5.2. Indicadores de Viabilidad de Instalaciones Agrivoltaicas

Los indicadores claves de rendimiento o *Key Performance Indexes*, KPI, en Agrivoltaica han sido estudiados por diversos autores como modo de descripción de los diferentes modos agrivoltaicos. Así, por ejemplo, Willockx et al. [164] proponen un conjunto de indicadores cualitativos y cuantitativos para evaluar los sistemas agrivoltaicos. Concretamente, como indicadores cualitativos propone:

- **Calidad de la producción agrícola:** La coexistencia de los módulos fotovoltaicos y el cultivo podrá afectar a la calidad del cultivo de manera positiva o negativa dependiendo del cultivo considerado. Asimismo, se ha comprobado que el cultivo se beneficia de la protección de los colectores. Por tanto, este indicador, a pesar de su difícil cuantificación, debe contemplar estos efectos en tanto que el valor de la producción agrícola puede variar.
- **Confort en las condiciones de trabajo:** A pesar de referirse a un aspecto raramente tratado en la bibliografía, Willockx et al. [164] incluyen este indicador que hace referencia a la mejora de las condiciones de trabajo en los sistemas agrivoltaicos. A este respecto, los investigadores señalan que, en situaciones de altos niveles de radiación, se recomienda a los trabajadores de determinados sistemas agrícolas (por ejemplo, cultivo en invernadero) hacer pausas a la sombra o incluso desplazar los horarios hacia las primeras horas del día como modos de protegerse de la sobreexposición solar. En este sentido, la sombra de los colectores solares podrá ayudar a mejorar las condiciones laborales de dichos trabajadores. Como modo de cuantificación, aproximado de este efecto los investigadores proponen utilizar los registros de la temperatura de globo y de bulbo húmedo (WBGT) medidas en grados Kelvin. Por otra parte, Pascaris et al. [165] consideran que condiciones del entorno de trabajo como el riesgo y la responsabilidad que supone desarrollar trabajos agrícolas en una explotación con un sistema eléctrico podrían ser un limitante en el desarrollo del modelo agrivoltaico y, consecuentemente, recomiendan que además de tomar las medidas oportunas para que la instalación sea segura, se deberá disponer de un seguro de responsabilidad civil para los trabajadores ante accidentes eléctricos.

Por lo que respecta a los indicadores cuantitativos, Willockx et al. [164] propone los siguientes indicadores:

- Rendimiento energético:** El rendimiento energético Y_{ele_APV} (kWh/ha año) se define como la energía eléctrica producida anualmente por unidad de terreno en ha. De acuerdo con esta definición, básicamente, este índice dependerá de la densidad superficial de módulos fotovoltaicos (medida en kWp/ha) así como de la tecnología fotovoltaica empleada (inclinaciones, distancias entre colectores, existencia de seguidores, programas utilizados para el control de seguidores). Además, influirán diferentes variables climáticas como la radiación solar, la temperatura ambiente y los efectos microclimáticos debidos a la sinergia con el cultivo. Además, en comparación con los sistemas fotovoltaicos estándar montados en el suelo, en los sistemas agrivoltaicos los colectores solares tendrán mayores interdistancias entre módulos y entre módulos e inversores, lo que implicarán longitudes de cable mayores y, por tanto, mayores pérdidas en los conductores por efecto Joule. Este rendimiento, en gran parte de las instalaciones agrivoltaicas se podrá determinar mediante los mismos programas informáticos que se utilizan en las plantas fotovoltaicas convencionales como, por ejemplo, PVGIS [166] que se trata de un software intuitivo (Figura 29) con acceso online público, o el programa SAM [167], desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory, también disponible para su uso público y que permite simular los flujos económicos asociados a las instalaciones fotovoltaicas, incorporando respecto a PVGIS la posibilidad de simular instalaciones con colectores bifaciales.

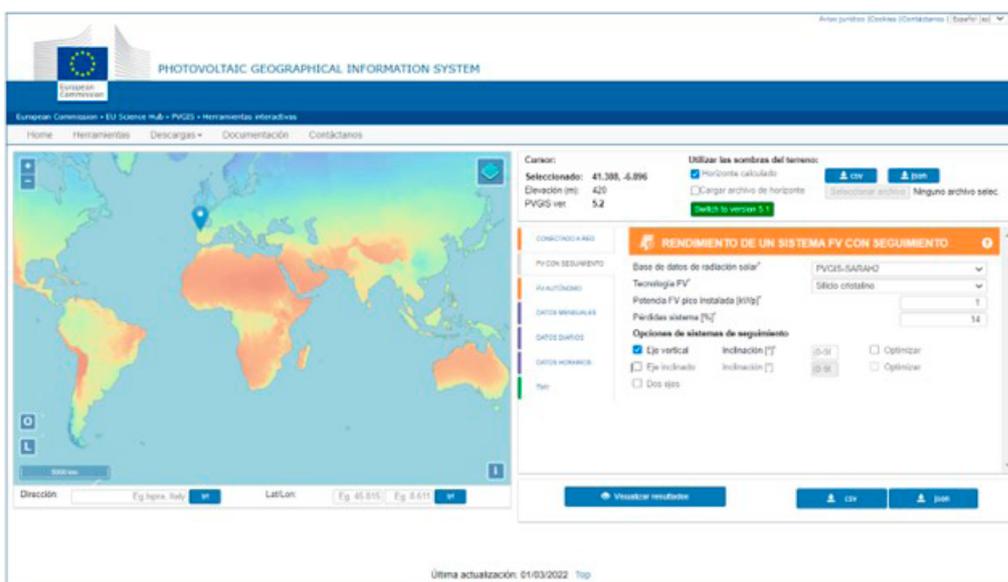


Figura 29. Interfaz del programa PVGIS [166].

- Rendimiento agrícola:** El rendimiento agrícola Y_{cul_APV} representa la cantidad total de producción agrícola con respecto a la superficie del terreno. Puede ser el peso específico en [kg/ha] por ejemplo de la producción final o de la materia seca de los cultivos en agrivoltaica [50].
- Land Equivalent Ratio (LER):** En 2011 Dupraz et al. [50] extendieron el uso a los sistemas agrivoltaicos del índice LER o Land Equivalent Ratio, previamente definido

y utilizado para caracterizar la producción de diferentes cultivos simultáneos en un mismo terreno. Así, al considerar dos actividades productivas coexistentes, en este caso producción agrícola y eléctrica, caracterizadas por los correspondientes rendimientos de producción agrícola Y_{cul_APV} (kg/ha año) y de producción eléctrica Y_{ele_APV} (kWh/ha año), el índice LER los compara con respecto a los respectivos rendimientos productivos cuando ambas actividades no comparten el terreno: Y_{cul_mono} (kg/ha año) y Y_{ele_mono} (kWh/ha año). De acuerdo con esta definición, el coeficiente LER vendrá dado por la ecuación (1):

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

Por tanto, el índice LER representa la ratio entre superficie necesaria para obtener la misma producción utilizando parcelas específicas donde las actividades no se asocian y la superficie con las actividades asociadas o simultáneas. Así, un valor para este índice superior a 1 indicará que es necesaria mayor superficie para obtener la misma cantidad de producción agrícola y eléctrica como actividades separadas que como actividades conjuntas o sinérgicas. Asimismo, los valores de LER obtenidos experimentalmente, permiten comparar campañas agrícolas y cultivos diferentes. A pesar de ser un índice sólo basado en la producción y que ignora los aspectos económicos, se trata del más utilizado en la bibliografía científica y de difusión. A modo de ejemplo ilustrativo, la Figura 30 muestra gráficamente los valores de LER en la instalación agrivoltaica de Heggelbach (Alemania) durante los años 2017 y 2018 [83].

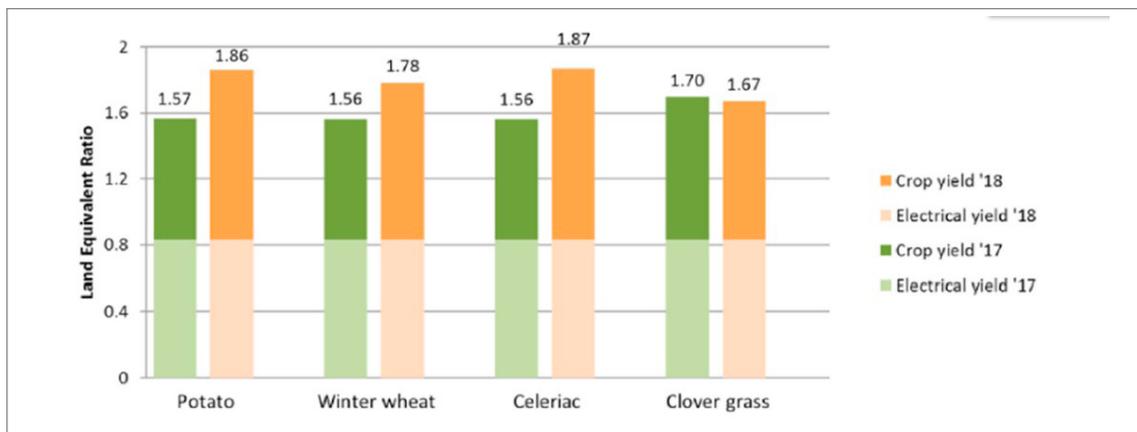


Figura 30. Valores experimentales de LER determinados en Heggelbach (Alemania) en 2017 y 2018 [83].

- **Ground Cover Ratio (GCR):** Este índice, ampliamente utilizado para caracterizar el diseño de plantas fotovoltaicas, se define como la relación entre el área de superficie de los colectores fotovoltaicos y la superficie del terreno ocupado por la instalación fotovoltaica, que en el caso de sistemas agrivoltaicos coincide con la superficie de la planta (Ecuación 2).

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

De acuerdo con su definición, se concluye que el GCR se encuentra muy relacionado con el sombreado o con la radiación solar incidente bloqueada por los cultivos. De esta forma, ante valores altos de GCR cabe esperar un alto rendimiento energético y, generalmente, un bajo rendimiento del cultivo debido a que la mayor densidad de colectores solares bloqueará la radiación solar incidente sobre el cultivo y, consecuentemente, la tasa de fotosíntesis disminuirá. Sin embargo, en climas áridos y semiáridos se han medido mejores producciones en condiciones de sombra respecto a las que no disponen de protección solar [168].

- **Ahorro de agua:** Un indicador importante para la agrivoltaica (especialmente en áreas áridas y semiáridas) es la influencia de los módulos fotovoltaicos en el balance hídrico. En primera instancia, el efecto de sombreado sobre los cultivos reduce las necesidades hídricas [98]. Esta reducción de necesidades se ha cuantificado en numerosos ensayos agrivoltaicos y se expresa como porcentaje de reducción de necesidades en el ciclo del cultivo frente al cultivo con idénticas condiciones, pero sin colectores solares. Son habituales porcentajes de reducción de necesidades hídricas comprendidos entre 10% y 20%. Por otra parte, el diseño de los colectores puede utilizarse para recoger el agua de precipitación sobre los mismos, conducirla y almacenarla. De este modo la explotación dispondrá de mayores reservas de agua de riego, lo que también supondrá un ahorro del agua a extraer de acuíferos o de cauces para realizar el riego [164].

Finalmente, entre los indicadores económicos cabe destacar:

- **Price Perform Ratio (PPR) o Ratio Precio versus Desempeño:** Se trata de un indicador que puede ser utilizado para toma de decisiones de carácter político ya que enfrenta el sobrecoste de adquirir un bien mediante una tecnología a la valoración de todos los beneficios económicos, sociales y medioambientales de implantar esta tecnología. Así, en el caso de la tecnología agrivoltaica, la implementación del índice se plantea como índice que evalúa la sustitución de una central fotovoltaica convencional por una agrivoltaica a cambio de obtener como beneficio la conservación del suelo agrícola. De acuerdo con esto, el PPR vendrá dado por la Ecuación 3 donde p (€/ha año) será el sobrecoste anual de la electricidad producida por una agrivoltaica respecto a la instalación convencional de referencia y p_b será el beneficio anual por hectárea, esto es, los beneficios asociados a la venta de la producción agrícola [49].

$$PPR = \frac{p}{p_b} \quad (3)$$

De este modo, el sistema agrivoltaico será más interesante cuando $PPR < 1$ (mayor beneficio que coste). Sin embargo, para que este índice pueda ser útil desde la perspectiva de la toma de decisiones políticas se deberá cuantificar además en p_b los beneficios de empleo y ambientales.

- **Levelized Cost of Energy, LCOE:** Este índice equivale al precio invariable de todo kWh producido, durante toda la vida del proyecto (n), considerando una determinada tasa de descuento i . La idea básica del método de cálculo es contrastar el capital de costes de inversión (CAPEX) y todos los gastos operativos (OPEX) menos el valor residual R_n disponible al final de la vida útil en el año n con el total de energía eléctrica generada al año M_t (Ecuación 4).

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

Los cálculos realizados y publicados para este índice por el Fraunhofer Institut [69] 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 techo pequeño. 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 31 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.

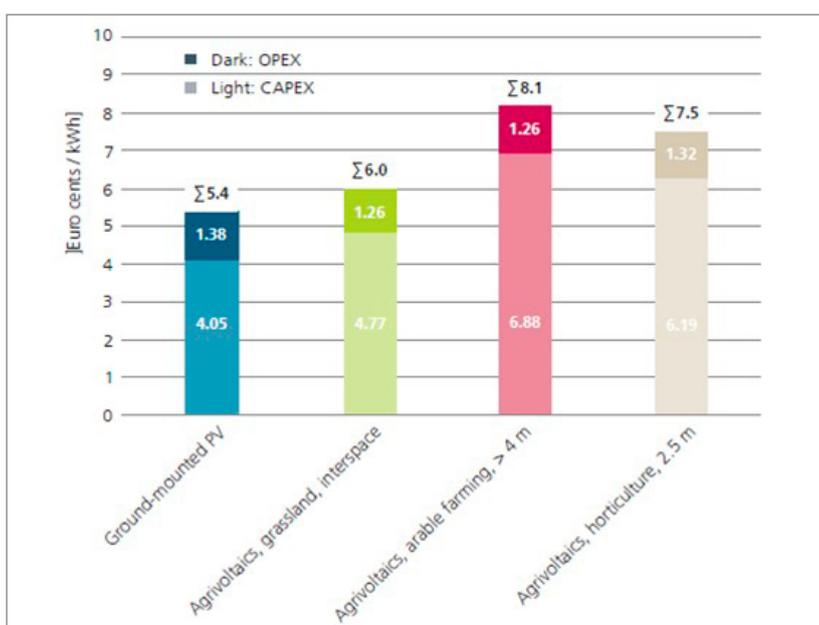


Figura 31. Estudio comparativo de costes de generación LCOE en sistemas agrivoltaicos [69].

- **Valor Actual Neto, VAN:** Se trata de un indicador que actualiza al momento actual todos los flujos de caja considerando para ello un tipo de descuento o actualización i . El VAN cuantifica en unidades monetarias la rentabilidad de un proyecto económico. Se determina mediante la Ecuación (5) en la que B_t representa el beneficio anual del proyecto.

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

De acuerdo con esta definición, un valor de VAN positivo implica un proyecto que globalmente generará beneficios. La comparación de las ecuaciones anteriores permite establecer una nueva visión del LCOE, en tanto que matemáticamente se demuestra que el LCOE es el valor de precio de venta de la energía que, siendo invariable durante la vida del proyecto, daría lugar a un VAN nulo. Así, para que un proyecto fotovoltaico genere beneficios, el precio de venta de la energía debe ser necesariamente superior al LCOE. De esta manera se entiende que el LCOE se identifique con los costes de generación eléctrica.

- **Tasa Interna de Rendimiento, TIR:** es un parámetro clave para evaluar inversiones ya que indica el porcentaje de ganancia o pérdida que se obtendrá en función de la cantidad invertida en un proyecto. De esta forma, la TIR permite comparar diferentes proyectos en términos de rentabilidad y determinar su viabilidad. Cuanto mayor sea la TIR, más atractiva será la inversión. Matemáticamente se obtiene tanteando diferentes valores de i en la Ecuación (5) e igualando la TIR a aquel valor que anule el VAN.

5.3. Modelos de Negocio en Agrivoltaica

De acuerdo con un estudio desarrollado en Alemania [43], la agrivoltaica puede proporcionar modelos comerciales viables, a pesar de que su coste de inversión inicial sea más alto. Para ello, como norma general, la inversión inicial se debe encontrar correlacionada con el valor de las cosechas. Asimismo, en un modelo equilibrado de ingresos no debe ocurrir sistemáticamente que en estos predominen los derivados de la venta de la energía eléctrica frente a los agrícolas. De esta forma, las siguientes condiciones respecto a los flujos de ingresos y de efectivo pueden conducir a una rentabilidad razonable:

- Provisión de un precio de venta superior a los establecidos para las instalaciones fotovoltaicas convencionales.
- Negociación para un adecuado acuerdo de compra de energía con una empresa comercializadora.

Por otra parte, los modelos de contrato de explotación de una planta agrivoltaica superan, por lo general, la complejidad de los de una instalación fotovoltaica en suelo debido al enfoque intersectorial de la agrivoltaica. Y es que en la implementación de la agrivoltaica hay varios actores a considerar en base a las siguientes funciones:

1. provisión de la tierra (propiedad);
2. manejo agrícola de la tierra;
3. provisión de sistemas agrivoltaicos (propiedad/inversión); y
4. operación del sistema fotovoltaico.

La Tabla 6 muestra los diferentes modelos de negocio posibles en la agrivoltaica en base a la asignación de estas funciones. En un caso base simple, las cuatro funciones pueden ser gestionadas, por una parte, a saber, el agricultor. Este modelo es posible para pequeños sistemas agrivoltaicos en pequeñas explotaciones donde los agricultores, además de poseer la tierra, pueden asumir la inversión. Además de los bajos costos de planificación de proyectos, la facilidad de contratación y el alto grado de descentralización, el principal beneficio de este modelo de negocio es que las posibles ventajas y desventajas de un sistema agrivoltaico se pueden considerar de manera más rápida y dinámica cuando las interacciones entre los

niveles agrícolas y fotovoltaicos impactan en la misma unidad económica. Sin embargo, en muchos casos, la tierra no es propiedad del agricultor. Por otra parte, cuanto mayor es el sistema fotovoltaico, menos probable es que el agricultor sea el dueño debiéndose incorporar al proyecto inversores externos. En esta línea, la propiedad parcial por parte del agricultor podría ayudar a mantener la estructura de incentivos para el uso dual sinérgico de la tierra. Sin embargo, cuanto mayor sea la proporción de capital externo, más difícil será realizar la contabilidad de beneficios de ambos niveles de producción durante la operación. Frente a ello, las oportunidades de escalamiento y la posible optimización a través de una mayor división de funcionamiento hablan a favor de este modelo de negocio [43].

TABLA 6. Modelos de negocio posibles en la agrivoltaica [43]

MODELO DE EXPLOTACIÓN	FUNCIÓN			
	PROVISIÓN DE TIERRAS	EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA	PROVISIÓN DEL SISTEMA PV	OPERADOR DEL SISTEMA PV
CASO BASE	Agricultor			
PROPIEDAD DE TIERRAS EXTERNA	Propietario	Agricultor		
INVERSIONISTA PV EXTERNO	Agricultor		Inversor fotovoltaico	Agricultor
CULTIVO Y OPERADOR PV	Propietario	Agricultor	Inversor fotovoltaico	Agricultor
SÓLO CULTIVO	Propietario	Agricultor	Inversor fotovoltaico	Operador fotovoltaico

Finalmente, por lo que respecta a las opciones de financiación de los sistemas agrivoltaicos, entre las que se pueden incluir préstamos bancarios, financiación del mercado de valores, crowdfunding, arrendamiento financiero y otros modelos financieros [43], no se han encontrado en la literatura científica investigaciones que examinen las opciones financieras más adecuadas, por lo que será necesario abordar estos estudios a medida que el sector evolucione, para determinar los modelos adecuados. Es probable que las estructuras de financiación dependan de los modelos de contrato de explotación que suscriban las diferentes partes interesadas.

6. LIMITACIONES DE LA AGRIVOLTAICA

6.1. Aceptación Social

El incremento del número de proyectos de plantas fotovoltaicas en terrenos rústicos en España ha motivado la reacción de colectivos en contra del auge de estas iniciativas que podría suponer un cambio en el entorno paisajístico y natural, así como en el sector turístico [35–40]. Este movimiento, ha venido a sumarse al activismo revisionista de diferentes asociaciones ecologistas y naturalistas que sistemáticamente han venido denunciando el daño medioambiental durante los periodos de exposición pública de los proyectos fotovoltaicos [41,42]. Con esta situación, es muy difícil conocer el posicionamiento social ante las soluciones agrivoltaicas. Si bien, estas instalaciones podrían mejorar la percepción social de problemas como la despoblación rural o el desarraigo de las poblaciones respecto de su territorio, no queda claro si seguirán produciendo rechazo por cuestiones medioambientales o paisajísticas.

Por otro lado, en el epígrafe 4.3. se han presentado los modelos de negocio propuestos para proyectos agrivoltaicos. En general, se tratan de modelos colaborativos donde algunos de los participantes podrían pertenecer o representar los intereses de las comunidades locales. Dependiendo del modelo de explotación agrivoltaica elegido, agricultores, gestores fotovoltaicos y ciudadanía, podrían llegar a acuerdos.

Por su parte, Ketzer et al. [169] realizaron un estudio en Alemania donde se evidenció la necesidad de una comprensión más completa de los aspectos técnicos y económicos, y de los problemas agrícolas en torno a los sistemas agrivoltaicos, así como de los factores que afectan la aceptación social. Concretamente, desde una perspectiva de su implementación, los sistemas agrivoltaicos son complejos ya que interactúan con la agricultura, la economía local y de las partes interesadas, así como con las percepciones sociales de la sostenibilidad y los paisajes. Así, por ejemplo, las instalaciones fotovoltaicas pueden afectar el paisaje visual y/o funcional, lo que implica riesgos de efectos en cascada en otros sectores (por ejemplo, turismo) y posibles impactos negativos sobre los mismos (por ejemplo, reducción del número de turistas y, consecuentemente, de la economía local). Por ello, los autores del estudio abordan la descripción del desarrollo de la agrivoltaica desde la perspectiva de la Dinámica de Sistemas (SD), identificando factores impulsores y restrictivos, pero también compensaciones y efectos inesperados. La comprensión de los mecanismos subyacentes del sistema permite una estimación de los resultados finales. Para la identificación de las fuerzas impulsoras de los sistemas agrivoltaicos, el enfoque SD destaca los factores impulsores identificados por las partes interesadas (agricultores, agentes fotovoltaicos, comunidades locales). Al mismo tiempo, la representación dinámica permite visualizar el impacto de las fuerzas restrictivas que podrían impedir una implementación exitosa de la agrivoltaica en tierras cultivables. Por lo tanto, el conocimiento alcanzado construye la base para identificar tendencias, perspectivas y recomendaciones. También identifica áreas de incertidumbre que requieren más conocimiento o aclaración, la necesidad de desarrollo y regulación de políticas, y factores restrictivos vistos por diferentes partes interesadas para definir regulaciones.

Los sistemas se describen mediante Diagramas de Bucle Causal (CLD) e ilustran la importancia y la influencia de la aceptación local, los marcos de planificación y el conocimiento local como

factores impulsores y restrictivos de la tecnología. Incorporar las perspectivas de las partes interesadas, los ciudadanos y los expertos en el diseño de un sistema permite identificar la necesidad de mejorar la tecnología y dar forma al marco político requerido.

De los tres CLD desarrollados por Ketzer et al., [169] la Figura 32 muestra las interrelaciones entre los agentes involucrados en las instalaciones agrivoltaicas. De acuerdo con dicho diagrama, el nivel de aceptación de las instalaciones agrivoltaicas depende del tamaño y agregación de plantas, así como de varios factores directos e indirectos. El interés de los agricultores en la agrivoltaica es un criterio de varios niveles que combina factores económicos y agrícolas (como la rentabilidad, las condiciones de cultivo, etc.), con aspectos sociales y legales (por ejemplo, conocimiento local). Si bien para los agricultores es atractivo el hecho de que existan inversores externos, estos resultan un factor restrictivo para la aceptación del público y su participación debería regularse mediante marcos legales de planificación. En este contexto el trabajo argumenta que los grandes agricultores no estarían interesados en la agrivoltaica a pesar de ser ésta junto con las acciones cooperativas las opciones preferidas por los ciudadanos. Ketzer et al. [169] también señalan que, para crear un marco de planificación legítimo a nivel local, los municipios deben definir planes de desarrollo que tengan en cuenta el conocimiento local y los criterios del sitio. Dicho marco impulsaría directa e indirectamente el crecimiento del número de instalaciones, lo que, a la larga, reduciría el nivel de aceptación pública de la agrivoltaica. Los ciudadanos y los representantes del turismo rechazarían una extensa área ocupada por la agrivoltaica ya que esto reduce el atractivo para el turismo y la recreación local.

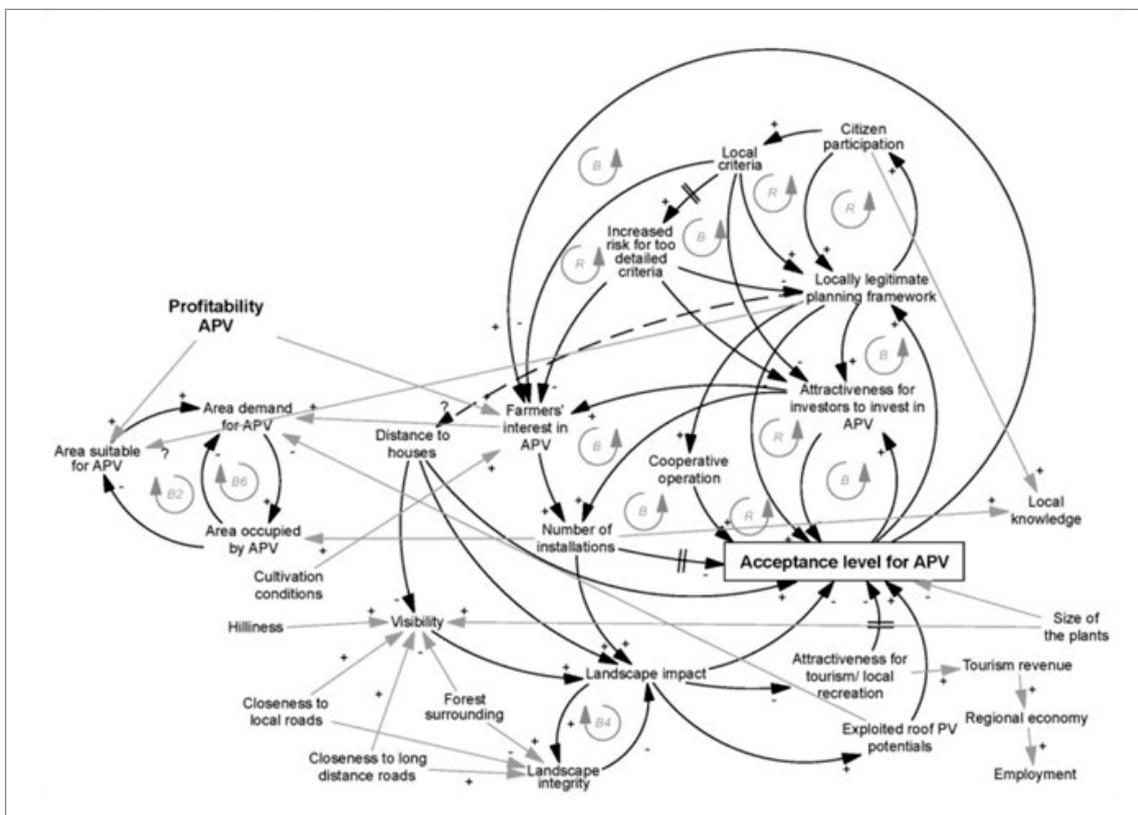


Figura 32. Diagrama Casual para identificar la interacción de los agentes participantes en una agrivoltaica [169].

Paralelamente, en el entorno estadounidense, Pascaris et al. [165] estudiaron la aceptación social, las barreras y oportunidades ante el desarrollo de plantas agrivoltaicas en los Estados Unidos desde el punto de vista de las dificultades para realizar acuerdos de colaboración entre participantes. El estudio realizó catorce entrevistas con personas que se autoidentificaron como desarrolladores solares, ingenieros de rendimiento solar y expertos en políticas energéticas. Diez de ellos tenían alguna experiencia con agrivoltaica, sobre todo en manejo de pastos para pastoreo o para potenciación de polinizadores. Del estudio se destacan reflexiones útiles en los siguientes ámbitos:

- **Complejidad, Riesgo, Seguridad, Responsabilidad:** Los profesionales de la industria solar consideran que los proyectos agrivoltaicos son complejos y requieren más coordinación. Aunque reconocen los beneficios de la agrivoltaica, muchos ven el esfuerzo adicional como un obstáculo. Sin embargo, algunos participantes ven una oportunidad en la colaboración con agricultores, destacando que puede fortalecer las relaciones comunitarias y facilitar la aceptación del proyecto. Además, abordan preocupaciones sobre riesgos y responsabilidades, sugiriendo que una coordinación adecuada puede superar estos desafíos y hacer que la agrivoltaica sea viable económicamente al reducir costos operativos.
- **Rentabilidad Económica:** Los participantes lamentaron las limitaciones económicas en los proyectos agrivoltaicos, señalando que deben ser financieramente viables. Algunos dudan de que los inversores financien estos proyectos debido a los riesgos y costos adicionales. Sin embargo, mencionaron que el pastoreo de animales podría reducir costos operativos y de mantenimiento, lo cual sería beneficioso para las compañías solares. Aunque no se esperan grandes ingresos, se considera que los ahorros potenciales y las sinergias derivadas del uso dual pueden convertir el desarrollo agrivoltaico en una ventaja en lugar de una carga. Los beneficios económicos y oportunidades destacan como cruciales para la aceptación del mercado.
- **Mantenimiento de los intereses agrícolas por las comunidades locales:** Los participantes compartieron experiencias donde la resistencia comunitaria detuvo sus proyectos, subrayando la relación entre el éxito en el mercado y la actitud pública hacia la energía solar. Los desarrolladores sugieren que los proyectos agrivoltaicos pueden aumentar la aceptación social, preservando la función agrícola de la tierra y alineándose con los intereses locales. Ven en la agrivoltaica una forma de mejorar la narrativa sobre el desarrollo solar, al combinar la producción de electricidad con la agricultura, lo que podría generar ingresos diversificados y fortalecer la aceptación comunitaria.
- **Aceptación sociopolítica:** En el desarrollo solar, el entorno regulatorio local es crucial para la aceptación socio-política. Los participantes en el estudio indicaron que la actitud pública y las políticas locales influyen significativamente en los proyectos solares. La aceptación comunitaria suele reflejarse en normativas de zonificación que favorecen el desarrollo solar. Sin políticas de apoyo, los proyectos agrivoltaicos enfrentan desafíos. Los participantes destacaron la importancia de asociarse con las comunidades para mejorar las actitudes y las políticas regulatorias. La agrivoltaica podría revitalizar las políticas locales, preservando los intereses agrícolas y facilitando la aceptación comunitaria. Este enfoque dual podría suavizar la oposición local y fomentar normativas que apoyen el desarrollo solar en tierras agrícolas.

En general, este estudio evidencia que los acuerdos entre los desarrolladores solares y agricultores, siendo necesarios, son dificultosos porque cada sector defiende intereses diferentes.

Finalmente, otro enfoque para mejorar la aceptación social podría ser la integración estética selectiva dependiendo del paisaje existente, prestando atención a las circunstancias locales [170]. Esto se puede lograr mediante diseños específicos, el uso de materiales orgánicos o el teñido de las células fotovoltaicas [170]. Como Zoellner et al. [171] concluyeron, a partir de estudios de casos en Alemania, que la aceptación de las energías renovables puede mejorarse involucrando al público en general en los procesos de toma de decisiones.

6.2. Falta de Datos sobre Producción Agrícola en condiciones de Agrivoltaica

Aunque los sistemas agrivoltaicos se están instalando cada vez más en todo el mundo, aún hay muy poca investigación científica que examine su impacto en parámetros agronómicos como el rendimiento de los cultivos o las necesidades hídricas, entre otros. Concretamente, apenas hay datos disponibles sobre el comportamiento bajo sombreado de gran número de especies de cultivos ni estudios experimentales suficientemente extendidos en el tiempo que permitan obtener resultados concluyentes. Además, los escasos resultados que se encuentran en la literatura científica provienen principalmente de experimentos agroforestales y de cultivos bajo redes de sombreado, por lo que existen dudas sobre su transferibilidad a los sistemas agrivoltaicos. De hecho, en una caracterización del estado de desarrollo de la tecnología agrivoltaica realizada en Francia [172] muchos agricultores mencionan la escasez de retroalimentación existente y, por lo tanto, la dificultad de evaluar las experiencias previas, lo que los obliga a realizar sus propios experimentos. Esto evidencia la necesidad de desarrollar investigaciones y estudios experimentales para distintos cultivos bajo sistemas agrivoltaicos. En este sentido, los efectos de protección de cultivos en circunstancias meteorológicas extremas (sequías, tormentas, viento...) que proporcionan los sistemas agrivoltaicos obligará a de ensayos de cultivo plurianuales, lo que dificultará aún más un rápido aprendizaje.

Normalmente, el cambio más frecuente que afectará el cultivo de plantas será la restricción en la disponibilidad de irradiación solar por el sombreado de los colectores, lo que generalmente afectará las condiciones microclimáticas en los cultivos agrivoltaicos y al rendimiento de los cultivos y la calidad de los productos agrícolas. Sin embargo, la magnitud de estos efectos dependerá en gran medida de las condiciones climáticas locales, en particular de la radiación solar, y de la implementación técnica del sistema agrivoltaico. Como consecuencia de todo lo expuesto, es difícil extrapolar los resultados de un determinado estudio a plantas agrivoltaicas en emplazamientos con diferentes condiciones climatológicas y, por tanto, identificar cultivos universalmente válidos para sistemas agrivoltaicos [173].

6.3. Manejo Técnico del Cultivo

Los sistemas agrivoltaicos imponen varios requisitos sobre la producción de cultivos y su gestión técnica que dan lugar a diversos problemas [174]. En primer lugar, la estructura de montaje debe ajustarse a los requisitos de la maquinaria agrícola utilizada. Como ya se ha mencionado anteriormente, los paneles fotovoltaicos deben elevarse para permitir el paso

de máquinas agrícolas convencionales. Por ejemplo, para el cultivo de cereales debido al uso de grandes cosechadoras combinadas, se requiere un espacio libre de, al menos, 4-5 m. Asimismo, para evitar la pérdida de terreno útil, la distancia entre pilares debe ser adecuada a las distancias de plantación y anchos de trabajo de la maquinaria. En este sentido, Dos Santos [174] afirma que las estructuras fotovoltaicas elevadas son en sí mismas una restricción, ya que los trabajadores deben estar autorizados a trabajar a cierta altura, viéndose sujetos a la correspondiente normativa de Prevención de Riesgos Laborales. Ante estas dificultades, el promotor podrá optar por otras tecnologías agrivoltaicas diferentes a los módulos elevados como pueden ser los sistemas basados en colectores superficiales con amplitud suficiente entre calles para permitir el cultivo.

Por otra parte, la estructura que soporta los paneles es una limitación para el agricultor ya que, una vez que se implementa, no puede cambiar las dimensiones de sus máquinas agrícolas. Además, a medida que disminuye la altura de los colectores, la heterogeneidad de la radiación que incide sobre el terreno de cultivo aumenta, lo cual no es beneficioso para algunos cultivos como, por ejemplo, los cultivos herbáceos [50]. En contraposición, no conviene elevar la altura sin control ya que la inversión inicial aumenta a medida que se elevan los colectores solares. Al mismo tiempo, la elevación de los paneles también es una limitación para la operación y mantenimiento de la planta fotovoltaica.

Por otra parte, la gestión de las malas hierbas en plantas agrivoltaicas requerirá más tiempo en cultivos anuales ya que habrá que prestar especial atención a las zonas que rodean los postes donde las labores agrícolas son más complicadas [108]. Asimismo, habrá que tener precaución con posibles enfermedades que prosperen en condiciones de sombra y humedad [108].

Finalmente, el sistema de riego también necesita ser adaptado y es necesario controlar la composición de fertilizantes y pesticidas para que no dañen la estructura metálica ni a los paneles.

6.4. Efecto de las Actividades Agrícolas en los Módulos Fotovoltaicos

La dispersión del polvo proveniente de fertilizantes y otros productos agrícolas, podría afectar a la potencia de salida del sistema y a la durabilidad de los materiales de los colectores solares. En este sentido, Jung et al. [175] evaluaron el impacto del polvo en una planta agrivoltaica piloto en la región de Santiago de Chile. Concretamente, realizaron mediciones de rendimiento global del generador fotovoltaico durante seis meses en verano y otoño para detectar pérdidas por suciedad. Las pérdidas promedio diarias por suciedad alcanzaron el 0,35 %/día, llegando el valor final de rendimiento al 40% en los meses de verano sin precipitaciones ni limpieza. En base a estos resultados, los autores consideran fundamental prestar atención a la suciedad en los sistemas agrivoltaicos, especialmente en zonas con períodos secos prolongados, ya que los eventos de autolimpieza por lluvia son escasos y los trabajos de campo en suelos secos generan altos niveles de polvo. Dado que se estima que las áreas secas y soleadas tienen un gran potencial para la aplicación de sistemas agrivoltaicos, los autores [175] sugieren que se investiguen soluciones técnicas para minimizar el impacto de la suciedad como la limpieza automatizada que permite el uso dual del agua para la limpieza y para el riego.

6.5. Legislación

El desarrollo de la Agrivoltaica en Alemania, Francia, Italia, Japón, Estado de Massachussets ha ido precedido del establecimiento de normativas para definir el concepto de Agrivoltaica, establecer sus condicionantes, realizar una clasificación y establecer líneas de apoyo y ayudas.

Sin embargo, en el caso de España, este cuerpo legal está por desarrollar, siendo conveniente estudiar la compatibilidad de estas instalaciones con otras normativas tales como la Política Agraria Común, la regulación relativa a la protección de los usos del suelo de las zonas regables declaradas de interés general, la legislación medioambiental, la normativa constructiva o la normativa de prevención de riesgos laborales, entre otras.

Concretamente, por lo que respecta a la Política Agraria Común, una pregunta importante es si una parcela de tierra agrícola reconvertida en sistema agrivoltaico perderá su elegibilidad para el apoyo financiero que la UE, en el marco de su política agraria, proporciona mediante pagos directos por tierras que se utilizan principalmente para la agricultura. A este respecto, en Alemania, las sentencias judiciales señalan que los sistemas agrivoltaicos permiten el uso mixto de la tierra para la agricultura como para la generación de electricidad a partir de energía solar. Concretamente, según el Tribunal Administrativo Federal alemán, esta regulación debe verse a través de la lente de la ley europea. Por tanto, el criterio crucial es que la intensidad, la naturaleza, la duración o el momento de los sistemas agrivoltaicos no deben limitar la actividad agrícola de manera severa. Esta opinión también fue adoptada por el Tribunal Administrativo Superior de Baviera. Por tanto, existiría una limitación severa de la actividad agrícola si existieran dificultades u obstáculos reales y significativos para las explotaciones afectadas como consecuencia de la realización de otra actividad simultánea. De esta forma, si no existen dichas dificultades, el tribunal dictamina que se debe otorgar el apoyo financiero. Por ello, es necesario establecer una norma concreta que regule las ayudas en los sistemas agrivoltaicos en función de la clasificación y categorización de los distintos tipos de instalaciones agrivoltaicas y que evite la aparición de la "pseudo-agricultura" [69].

Asimismo, es necesario evaluar el impacto sobre la agrivoltaica de la Regulación relativa a la Protección de los Usos del Suelo de las Zonas Regables declaradas de Interés General [176]. Esta norma limita la implantación de las plantas fotovoltaicas convencionales a gran escala por considerarlas incompatibles con el regadío, pues implican un menor aprovechamiento agrícola y ganadero, así como afecciones negativas para un suelo de calidad, con alto valor ecológico para el cultivo, conllevando una posible disminución notable de su potencial productivo. La justificación de la norma también contempla la pérdida de renta que conllevaría: "... irremediablemente, a una despoblación en el medio rural". Por tanto, una aplicación restrictiva de esta norma, que no delimita el término "planta fotovoltaica a gran escala", impediría el desarrollo de la agrivoltaica en combinación con cultivos de mayor valor con riego. Sin embargo, tal y como se ha visto a lo largo de este informe, esencialmente, la agrivoltaica tiene por objetivo compatibilizar la fotovoltaica con la agricultura, protegiendo la producción y el suelo agrícola, siendo precisamente la reactivación y protección de las zonas rurales una de las consecuencias de su implementación. Además, de aplicarse esta norma a la agrivoltaica se perdería la posibilidad del doble uso del agua para limpieza de módulos y riego de cultivos.

7. POLÍTICAS Y PROGRAMAS DE FOMENTO DE LA AGRIVOLTAICA

7.1. Régimen Jurídico de la Tecnología Agrivoltaica

Durante los últimos quince años, la legislación de la Unión Europea (UE) para el fomento de las energías renovables ha experimentado cambios significativos. En su articulado se encuentran constantes referencias a las diversas fuentes de energía renovable como instrumentos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia respecto de los combustibles fósiles. Sin embargo, la UE no ha desarrollado hasta la fecha una normativa que regule de forma integral el sector de la energía agrivoltaica. Únicamente se cuenta con regulaciones y normas fragmentadas que hacen referencia a cuestiones de índole técnica y a todo un elenco de normativa europea sobre las energías renovables que sería de aplicación al caso de la energía agrivoltaica y que se basan en la combinación de la agricultura y la energía. Concretamente, en la Directiva de Energías Renovables de la UE (2018/2001) [177], modificada por la 2022/0160 (actualmente en trámite) y en la Política Agrícola Común de la UE ya se establecen requisitos generales para la producción de energía renovable y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles.

A nivel nacional, la Disposición adicional centésima vigésima segunda, de la Ley 31/2022, de 23 de diciembre, de Presupuestos Generales del Estado para el año 2023, hace referencia al impulso de la energía agrivoltaica. En este sentido, el texto legal exhorta al Gobierno a fomentar su implantación a la vez que establece el mandato de analizar los factores que puedan impulsar su desarrollo, como son el uso del suelo o la compatibilidad con las ayudas de la Política Agraria Común y de otras políticas sectoriales. Asimismo, y en línea con el marco del Plan de Recuperación se posibilita la creación de líneas de apoyo específicas para el desarrollo de proyectos agrivoltaicos.

En otro orden normativo, la Orden CIN/533/2022, de 6 de junio, por la que se aprueban las bases reguladoras de la concesión de ayudas públicas a proyectos en líneas estratégicas, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, y por la que se aprueba la convocatoria correspondiente al año 2022, incluye en su Anexo II el desarrollo e integración de aplicaciones agrivoltaicas.

En este sentido, cabrá, a futuro, evaluar la adecuación de las distintas restricciones o condicionantes normativos, ante el posible desarrollo de los sistemas agrivoltaicos, de modo que se garantice, a su vez, el respeto de zonas protegidas, de interés general, etc.

Por todo ello, es necesaria una normativa específica del sector agrivoltaico que remueva los obstáculos que impiden su implantación y doten al sector de una seguridad jurídica estableciendo el marco legislativo de aplicación en el que debe hacerse una especial mención a la compatibilidad con otro tipo de ayudas y políticas sectoriales.

7.2. Prospección de Programas de Fomento de la Agrivoltaica y Proceso de Certificación

La agrivoltaica se presenta como una solución para aumentar la producción de energía solar sin afectar negativamente al medio ambiente ni mermar la capacidad agrícola. En esta línea, en la Unión Europea (UE), algunos Estados Miembros de la UE y no miembros han puesto

en marcha políticas encaminadas al fomento de la agrivoltaica y se están llevando a cabo proyectos para estudiar la eficacia y la sostenibilidad de la agrivoltaica, y para establecer directrices y normas específicas para su aplicación. A continuación, se presenta el marco normativo y los posibles incentivos en aquellos países que han regulado esta tecnología.

7.2.1. Japón

Japón ha sido el primer país en introducir una regulación para la actividad agrivoltaica. La legislación y las regulaciones aplicables en Japón incluyen:

- Ley de energía renovable: Esta ley establece objetivos vinculantes de energía renovable para Japón y proporciona incentivos financieros para fomentar la producción de energía renovable, incluida la agrivoltaica.
- Acta de industria agrícola y pesquera mejorada: Fomenta el desarrollo de la industria agrícola y pesquera y establece directrices para el uso de la tecnología agrícola avanzada, incluida la agrivoltaica.
- Acta de seguridad alimentaria: Establece reglas y regulaciones para garantizar la seguridad alimentaria en la producción agrícola, incluida la producción agrícola bajo paneles solares.

Además, el gobierno japonés ha apoyado proyectos de investigación y desarrollo en Japón para estudiar la eficacia y la sostenibilidad de la agrivoltaica y establecer directrices específicas para su aplicación práctica. Asimismo, ha establecido programas de apoyo financiero para la adopción de la agrivoltaica, como el *Programa de incentivos para la agricultura sostenible y la generación de energía renovable*. La materialización de estos incentivos se concretó en 2019 con el concepto de "solar sharing". Así, en marzo de 2019 había casi 2000 granjas de "solar sharing" en el país, que representaban alrededor del 0,6%-0,8% de la capacidad fotovoltaica total. La política de "solar sharing" se centra en instalaciones a pequeña escala, con un 89% de tamaño de hasta 0,3 ha y sólo un 3% de más de 1 ha. Esto refleja la conceptualización del "solar sharing" como un programa de apoyo a los agricultores y para responder al estancamiento de los ingresos agrícolas y al rápido envejecimiento de la población rural. De hecho, una gran parte de la tierra utilizada (31%) estaba abandonada, en barbecho o eran tierras de cultivo degradadas. La mayoría de las nuevas instalaciones tienen un índice de sombreado del 20% al 50% mientras que alrededor de un tercio de estas instalaciones tienen un índice de sombreado del 50%-80%. Los principales cultivos son setas, diferentes tipos de té o Myoga (*Zingiber Myoga*).

El Ministerio de Agricultura, Bosques y Pesca ha establecido directrices técnicas para aprobar el concepto de "solar sharing" y su elegibilidad para una FiT (Feed in Tariff) incrementada, concepto que se refiere a una retribución fija por la energía vertida a la red. Este marco regulador se introdujo por primera vez en 2013 y se ha ajustado varias veces, incluida una actualización en 2020.

No obstante, se establecen una serie de requisitos para que una instalación sea considerada agrivoltaica:

- Debe existir un plan agrícola claro y garantizarse la continuidad de las actividades agrícolas.

- Los módulos fotovoltaicos deben elegirse de forma que se garantice la incidencia de la radiación para la producción de cultivos y la estructura de montaje debe tener una elevación de unos 2 m para asegurarse de que no obstaculiza el uso de la maquinaria agrícola.
- No debe haber ningún efecto sobre las tierras de cultivo vecinas.
- El rendimiento de los cultivos debe alcanzar el 80% del rendimiento estándar local y se debe presentar un informe anual como prueba de ello.
- Por último, si no se cumplen estas condiciones, los sistemas agrivoltaicos deben retirarse y restaurarse el terreno.

7.2.2. Italia

El Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia en Italia. En el marco de este plan contempla invertir 59.460 millones de € en el capítulo de energía renovables. De ellos, 1.100 millones se destinarán a agrivoltaica, con el objetivo de alcanzar 1,04 GW de potencia instalada en junio de 2.026. Como paso previo, en 2022, el Ministerio de Medio Ambiente y de Seguridad Energética publicó el documento "Directrices para la implantación agrivoltaica" [178]. Además de otros aspectos, este documento establece los requisitos que deben cumplir las instalaciones para alcanzar la consideración de agrivoltaica.

- **REQUISITO A:** una planta agrivoltaica debe permitir la integración entre la actividad agrícola y la producción de energía eléctrica e incrementar el potencial productivo de ambos subsistemas. Esto se respeta si:
 - al menos el 70% de la superficie total del sistema agrivoltaico se destina a la actividad agrícola, en cumplimiento de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) definidas en aplicación de lo dispuesto en el apartado 1 del art. 28 del Reglamento CE n. 1750/99 y lo dispuesto en el apartado 2 del art. 23 del Reglamento CE 1257/99, en el marco de los planes de desarrollo rural.
 - la relación entre la superficie total del sistema agrivoltaico (suma de las superficies identificadas por el perfil externo del tamaño máximo de todos los módulos fotovoltaicos que componen el sistema, esto es, la superficie activa incluido el marco) y la superficie total ocupada por el sistema agrivoltaico es inferior o igual al 40%
- **REQUISITO B:** una planta agrivoltaica debe garantizar la producción sinérgica de electricidad y productos agrícolas y no comprometer la continuidad de la actividad agrícola y pastoril. En cuanto a la continuidad de la actividad agrícola, es necesario mantener o mejorar:
 - La capacidad productiva, en términos de valor económico. Por ejemplo, una posible reconversión de la actividad agrícola de un enfoque intensivo (p. ej., horticultura) a uno mucho más extensivo (p. ej., tierras de cultivo o praderas de pastos) no cumpliría este criterio.
 - El rendimiento del cultivo, en €/ha o €/LU (Unidad Ganadera Adulta), comparándolo con el valor medio de la producción agrícola registrada en la superficie destinada al sistema agrivoltaico en los años anteriores, con la misma capacidad de producción.

En caso de no existir producción agrícola en la zona en los años anteriores, se podrá hacer referencia a la productividad media de la misma producción agrícola en el área geográfica que abarque la instalación. Alternativamente, es posible monitorizar los datos previendo la presencia de un área de control que permitiría realizar una estimación de la producción en el suelo subyacente a la planta.

También es necesario garantizar una producción eléctrica mínima. Así, una solución agrivoltaica debe tener al menos el 60% de la producción de una solución estándar, considerando (GWh/ha·año).

- **REQUISITO C:** una Planta Agrivoltaica debe adoptar soluciones integradas innovadoras con módulos elevados del suelo. En este sentido, se pueden distinguir tres tipos de sistemas:
 - TIPO 1) el cultivo se realiza entre las hileras de módulos fotovoltaicos, y debajo de ellos: máxima integración
 - TIPO 2) el cultivo se realiza entre las filas de módulos fotovoltaicos, y no debajo de ellos: integración media
 - TIPO 3) El cultivo se realiza entre hileras de módulos fotovoltaicos, dispuestos verticalmente.

La altura mínima, medida con los módulos colocados en la máxima inclinación técnicamente alcanzable, debe ser:

- 1,3 metros en el caso de actividad zootécnica (altura mínima para permitir el paso del ganado con continuidad);
 - 2,1 metros en el caso de cultivo (altura mínima para permitir el uso de maquinaria funcional).
- **REQUISITO D:** en un sistema Agrivoltaico, se debe monitorizar el impacto en los cultivos, el ahorro de agua, la productividad agrícola para los diferentes tipos de cultivos y la continuidad de las actividades de las fincas involucradas. En cuanto al seguimiento del ahorro de agua, este se puede realizar, por ejemplo, a través de un informe trienal elaborado por el productor, que tenga en cuenta:
 - autoabastecimiento: el uso del agua puede medirse por los volúmenes de los tanques tomados a través de bombas discontinuas o a través de medidores colocados en pozos o puntos de extracción de cursos de agua o embalses, o a través del conocimiento del caudal permitido (l/s) presente en la escritura de concesión a derivar junto con el tiempo de funcionamiento de la bomba;
 - servicio de riego: el uso del agua puede ser medido a través de medidores/caudalímetros fiscales de la finca y en el by-pass dedicado al riego del sistema agrivoltaico.
 - mixta: cuyo consumo de agua puede medirse mediante la disposición de los dos sistemas de medición mencionados

En lo que se refiere al seguimiento de la continuidad de la actividad agrícola (es decir, el impacto sobre los cultivos, la productividad agrícola para los diferentes tipos de cultivos

o ganadería y la continuidad de las actividades de las fincas afectadas) los elementos a monitorizar durante la vida de la planta son:

- La existencia y rendimiento del cultivo;
- El mantenimiento de la producción;

Esta actividad se puede realizar mediante la redacción de un informe técnico jurado por un ingeniero agrónomo con una frecuencia fija. A la memoria podrán adjuntarse los planes anuales de cultivo, que contengan indicaciones sobre las especies cultivadas anualmente, la superficie efectivamente destinada al cultivo, las condiciones de crecimiento de las plantas, las técnicas de cultivo (disposición de plantación, densidad de siembra, uso de fertilizantes, tratamientos fitosanitarios).

- **REQUISITO E:** en un sistema agrivoltaico se debe monitorizar la recuperación de la fertilidad del suelo, el microclima y la resiliencia al cambio climático.

En cuanto a la recuperación de la fertilidad del suelo, es importante hacer un seguimiento de los casos en los que se ha reanudado la actividad agrícola sobre superficies agrícolas no utilizadas en los últimos 5 años. Este aspecto puede ser monitorizado como parte del informe agronómico antes mencionado, o a través de una declaración del proponente. En lo que respecta al microclima, es posible utilizar sensores de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire junto con sensores para medir la radiación colocados debajo de los módulos fotovoltaicos y, por comparación, en el área inmediatamente adyacente pero no cubierta por el sistema. En particular, el seguimiento podría referirse a:

- la temperatura ambiente externa (adquirida cada minuto y almacenada cada 15 minutos) medida con un sensor (preferiblemente PT100) con incertidumbre inferior a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- la temperatura detrás del módulo (adquirida cada minuto y almacenada cada 15 minutos) medida con un sensor (preferiblemente PT100) con una incertidumbre inferior a $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$;
- la humedad del aire ambiente exterior y detrás del módulo, medidos con higrómetros/psicrómetros (adquiridos cada minuto y memorizados cada 15 minutos);
- la velocidad del aire exterior y detrás del módulo, medidos con anemómetros.

Los resultados de este seguimiento pueden ser registrados, por ejemplo, a través de un informe trienal elaborado por el proponente.

También es necesario monitorizar la resiliencia al cambio climático:

- en la fase de diseño: el diseñador debe realizar un informe que contenga el análisis de los riesgos climáticos físicos según la ubicación, identificando las soluciones de adaptación;
- en la fase de seguimiento: el organismo que concede los incentivos verificará la implementación de las soluciones de adaptación climática identificadas en el informe mencionado en el punto anterior (por ejemplo, solicitando documentación, incluidas fotografías, de la fase de construcción y del estado final).

En la Tabla 7 se pueden identificar las diferentes definiciones del ámbito de la agrivoltaica en base a los requisitos expuestos más arriba.

Tabla 7. Definiciones de agrivoltaica en Italia [179]

DEFINICIONES	REQUISITOS	TIPOLOGÍA	ALTURAS MÍNIMAS
Sistema agrivoltaico	A, B, D	Tipo 2	
Sistema agrivoltaico avanzado, compatible con los incentivos del DL 24/01/2012	A, B, C, D	Tipo 1 y 3	2,1 m
Sistema agrivoltaico innovador, compatible con los incentivos contemplado en el PNRR	A, B, C, D, E	Tipo 1 y 3	

7.2.3. Alemania

El objetivo del gobierno alemán es pasar de 60 a 215 GWp de potencia solar fotovoltaica instalada. En esta línea, desde el año 2021, la agrivoltaica aparece en la revisión de la ley de Energías Renovables [180], junto con la fotovoltaica flotante y las instalaciones sobre cubiertas de parkings. Concretamente, se concede acceso garantizado a la red y a las tarifas reguladas previstas en la Ley de Energías Renovables (EEG 2023). Así, en el artículo 48 se fija una retribución de 0,07 €/kWh para instalaciones fotovoltaicas de diversos tipos y, en el punto 5, la norma contempla posibles plantas agrivoltaicas en:

- a) en tierra cultivable que no sea suelo de turba y que no haya sido designada legalmente como reserva natural en el sentido de la Sección 23 de la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza o como parque nacional en el sentido de la Sección 24 de la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza,
- b) en pastizales con uso agrícola simultáneo como pastizales permanentes, si el área no es un páramo, no ha sido designada legalmente como área de conservación de la naturaleza en el sentido de la Sección 23 de la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza o como parque nacional en el sentido de la Sección 24 de la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza, no en un área Natura 2000 en el sentido del § 7 párrafo 1 número 8 de la Ley Federal de Conservación de la Naturaleza y no es un tipo de hábitat enumerado en el Anexo I de la Directiva 92/43/CEE [181].

El Gobierno alemán también ha aclarado que los terrenos agrícolas utilizados simultáneamente para agrivoltaica y producción fotovoltaica sigue siendo elegible para la obtención de hasta del 85% de las subvenciones estándar (pagos directos) concedidas en virtud de la Política Agrícola Común (PAC) de la UE, siempre que al menos el 85% de la tierra pueda seguir utilizándose para el cultivo.

Asimismo, es interesante que en las explotaciones agrícolas se permiten dos instalaciones independientes, una de autoconsumo para la vivienda y otra de vertido para el sistema agrivoltaico.

Finalmente, la norma DIN SPEC 91434 [182] fija los requisitos técnicos, así como una metodología para el seguimiento, en cuanto a medición de parámetros indicativos del desempeño de las instalaciones agrivoltaicas. Asimismo, contempla la formalización de un acuerdo de utilización agrícola entre el agricultor y el contratista encargado del diseño y ejecución de la instalación fotovoltaica.

En primer lugar, la norma establece una categorización que se muestra en la Tabla 8. Esta clasificación se refiere, tanto al tipo de estructura fotovoltaica como al tipo de cultivo elegible a efectos de subvenciones.

TABLA 8. Categorización de las instalaciones agrivoltaicas en Alemania [182].

SISTEMAS AGROVOLTAICOS	USO	EJEMPLOS
Categoría I: Soporte elevado con altura libre: Explotación bajo la instalación agrivoltaica	1A: Cultivos permanentes y cultivos plurianuales	Fruticultura, cultivo de frutos rojos, viticultura, lúpulo
	1B: Cultivos anuales y de más de un año	Cultivos herbáceos, cultivos hortícolas, prados temporales, forrajes herbáceos
	1C: Pastos permanentes con corte	Pastos de explotación intensiva, pastos de uso extensivo
	1D: Pastos permanentes con pastoreo	Pastos permanentes, pastos divididos (por ejemplo, vacuno, aves de corral, ovejas, cerdos y cabras)
Categoría II: Soporte elevado cerca del nivel del suelo: explotación entre las filas de la instalación agrivoltaica	2A: Cultivos permanentes y plurianuales	Fruticultura, cultivo de frutos rojos, viticultura, lúpulo
	2B: Cultivos anuales y de más de un año	Cultivos herbáceos, cultivos hortícolas, prados temporales, forrajes herbáceos
	2C: Pastos permanentes con corte	Pastos de explotación intensiva, pastos de uso extensivo
	2D: Pastos permanentes con pastoreo	Pastos permanentes, pastos divididos (por ejemplo, vacuno, aves de corral, ovejas, cerdos y cabras)

En la Categoría I los módulos pueden montarse en distintos ángulos o posiciones para cubrir total o parcialmente la superficie dedicada al cultivo. En todo caso, la altura libre en la posición más baja de los módulos fotovoltaicos no será inferior a 2,1 m, quedando libre de cultivo únicamente la superficie destinada a los soportes de la estructura. La Figura 33 muestra las tipologías de instalaciones agrivoltaicas que se incluyen en la categoría I de la norma DIN SPEC 91434 [183], donde:

- A_L superficie aprovechable para la agricultura
- A_N superficie no aprovechable para la agricultura
- h_2 altura libre por encima de 2,10 m

- 1 ejemplos de módulos solares
- 2 refuerzo
- 3 soporte de elevación
- 4 a 7 ejemplos de cultivos agrícolas

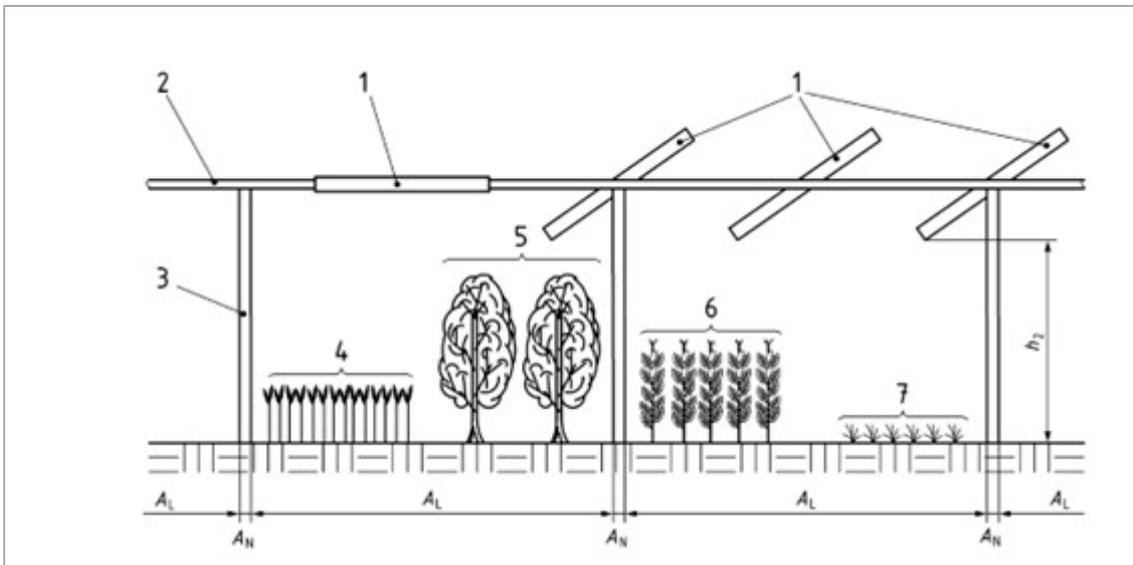


Figura 33. Instalaciones de categoría I según la norma alemana DIN SPEC 91434 [182]

Las instalaciones agrivoltaicas de Categoría II se sitúan cerca del nivel del suelo de manera que la explotación agrícola tiene lugar entre las filas de la instalación. La Figura 34 y la Figura 35 muestran las tipologías de instalaciones agrivoltaicas que se incluyen en la categoría II de la norma DIN SPEC 91434 [182], donde:

- A_L superficie aprovechable para la agricultura
- A_N superficie no aprovechable para la agricultura
- h_1 altura libre por debajo de 2,10 m
- h_2 altura libre por encima de 2,10 m
- 1 ejemplos de módulos solares
- 2 soporte de elevación
- 3 a 6 ejemplos de cultivos agrícolas

Se distingue entre instalaciones, en las que los módulos solares se instalan sobre una estructura fija en un ángulo determinado sobre uno o dos postes (Figura 34), o instalaciones, en las que los módulos solares están montados de forma vertical o ajustable (solar tracking) sobre un poste (Figura 35). En principio, la superficie bajo módulos con una altura libre inferior a 2,10 m se deberá considerar como una superficie no utilizable para la agricultura (A_N),

aunque si en la declaración de utilización agrícola se considera que por debajo de la altura de 2,1 m se puede llevar a cabo el cultivo, con un rendimiento de al menos el 66%, A_N se reducirá en consecuencia.

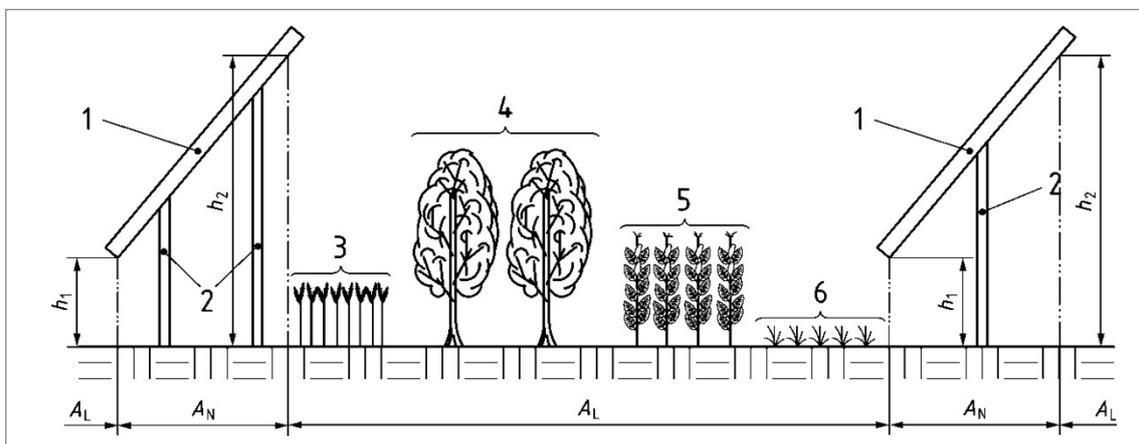


Figura 34. Instalaciones de categoría II, variante 1, según la norma alemana DIN SPEC 91434 [182]

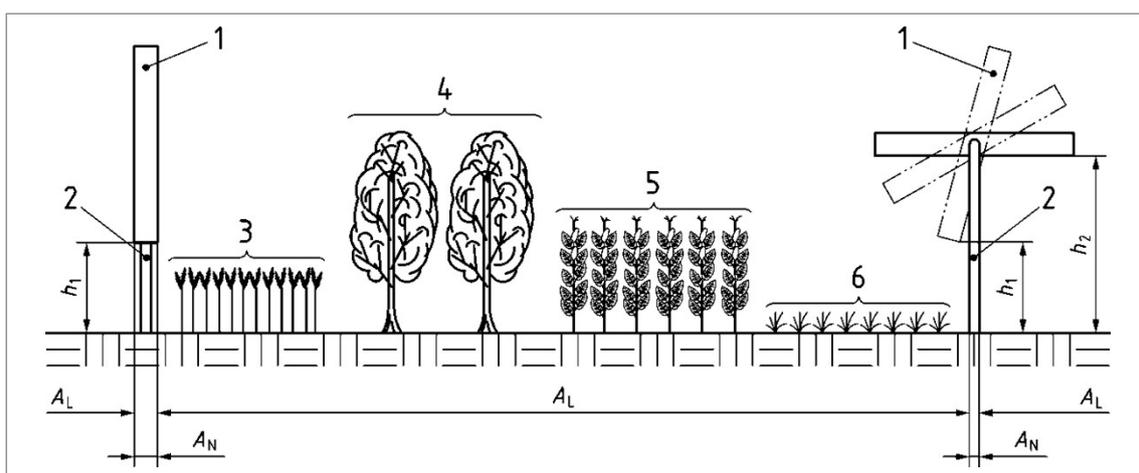


Figura 35. Instalaciones de categoría II, variante 2, según la norma alemana DIN SPEC 91434 [182]

En cuanto a los requisitos agrícolas, se exige:

- Mantenimiento del cultivo durante 3 años o un ciclo de rotación. Es posible un cambio de uso simultáneo a la construcción de la instalación agrivoltaica, pero no un cambio de uso de 1A y 1B, o 2A y 2B a 1C y 1D, o 2C y 2D. Si se optimiza la utilización agrícola en la superficie total del proyecto, es posible cambiar entre las categorías 1A, 1B, 2A, 2B, 1C, 1D, 2C y 2D, siempre que las proporciones de superficie de los tipos de uso sobre la superficie total del proyecto correspondan al uso anterior.
- Formalización del acuerdo de utilización agrícola. En este acuerdo debe prestarse especial atención a los siguientes conceptos:
 - **Soporte de elevación:** Los módulos fotovoltaicos de las instalaciones de ambas categorías deben instalarse y distribuirse de manera uniforme sobre la superficie total del proyecto, de modo que siga siendo posible usar el resto de la superficie.

La distancia entre los distintos postes con respecto a la dirección del cultivo debe ser lo suficientemente amplia como para que se pueda continuar usando la tierra de la forma anterior y mantenga la producción de los cultivos. La altura libre para las instalaciones agrivoltaicas de categoría I debe cumplir con la ley de protección laboral. No se requiere un soporte de elevación de altura libre para las instalaciones agrivoltaicas de categoría II. El tipo de soporte de elevación debe garantizar que la superficie puede ser aprovechada.

- **Pérdida de superficie:** La pérdida de superficie utilizable para la agricultura debida a las estructuras y subestructuras no debe superar el 10 % de la superficie total del proyecto para la categoría I y el 15 % para la categoría II.
- **Usabilidad del terreno:** Debe garantizarse que toda la superficie pueda ser aprovechada, de modo que toda la superficie utilizable para la agricultura se pueda cultivar y, en su caso, recorrer.
- **Disponibilidad y homogeneidad de la luz:** El crecimiento de las plantas en general, así como los mismos periodos de cosecha y las buenas prácticas agrícolas deben garantizarse mediante una homogeneidad lumínica lo más alta posible y una disponibilidad de luz adecuada. La intensidad de la luz, el sombreado y la homogeneidad de la luz, así como los efectos de borde, deben comprobarse y adaptarse a las necesidades respectivas de los productos agrícolas. Si no se cumplen estos requisitos, el acuerdo de uso agrícola debe probar que la utilización agrícola está, no obstante, garantizada.
- **Disponibilidad del agua:** La disponibilidad del agua en la instalación debe adaptarse a las condiciones de crecimiento del cultivo. Se debe prestar atención a la distribución homogénea del agua de lluvia en el cultivo bajo la instalación agrivoltaica. Para comprobar la disponibilidad del agua en la superficie aprovechable para la agricultura y el diseño previsto de la instalación agrivoltaica, se pueden utilizar los siguientes enfoques:

1. La presencia de un sistema de riego que garantice la irrigación suficiente de la superficie aprovechable para la agricultura;
2. Una evaluación, caso por caso, relacionada con el diseño de la instalación y el cultivo, según la cual se puede satisfacer la necesidad de agua del cultivo en las condiciones climáticas habituales del lugar.

- **Erosión del suelo:** El agua que gotea de los módulos puede generar un borde de goteo con el consiguiente humedecimiento del suelo. En todas las instalaciones agrivoltaicas, la aparición de erosión y encenagamiento debido a los bordes de goteo del agua se debe minimizar mediante un diseño adecuado. Se pueden utilizar sistemas de captación de agua de lluvia adaptados al cultivo, distribuidores de agua de lluvia o construcciones similares adecuadas.
- **Construcción y desmantelamiento sin residuos:** Se debe garantizar el desmantelamiento del sistema agrivoltaico, en particular la cimentación y el anclaje, para que el uso agrícola se mantenga en su estado original después del desmontaje de la instalación.

Si la estructura del suelo se deteriora durante la construcción y/o el desmantelamiento de la instalación, deberán adoptarse posteriormente medidas compensatorias para restablecer la estructura original del suelo.

- **Cálculo de la rentabilidad económica:** Como parte del acuerdo para la utilización agrícola, debe presentarse un acuerdo económicamente viable para la utilización agrícola desde la perspectiva del agricultor.
- **Eficiencia del uso del suelo:** Debe garantizarse que el rendimiento del cultivo(s) agrícola(s) en la superficie total del proyecto tras la construcción de la instalación agrivoltaica sea como mínimo el 66 % del rendimiento de referencia. La reducción del rendimiento de los cultivos agrícolas se debe a la pérdida de superficie fértil para el cultivo a causa de la estructura/subestructura de la instalación fotovoltaica y a la disminución del rendimiento debido al sombreado, a una menor disponibilidad del agua, etc.
- **Determinación del rendimiento de referencia:** La reducción del rendimiento debe registrarse en el acuerdo de uso agrícola. Para ello, hay que determinar el rendimiento de referencia. Esto puede hacerse de la siguiente manera:
 1. Cuando el cultivo ya se ha plantado en la superficie total del proyecto o en otra superficie de la explotación: En el caso de los cultivos permanentes y los pastos, se promedia el rendimiento de los últimos 3 años. En las rotaciones de cultivos herbáceos, se debe promediar el rendimiento de cada uno de los cultivos a lo largo de 3 ciclos de rotación.
 2. Cuando todavía no se han sembrado cultivos en la explotación: Se considerarán los rendimientos medios de los tres últimos años, extraídos de las publicaciones pertinentes (por ejemplo, estadísticas agrícolas de los estados federados), se establecen como rendimientos de referencia.
- **Determinación de la reducción del rendimiento de los cultivos en la superficie total del proyecto:** La reducción máxima del rendimiento de un 33% sobre el rendimiento de referencia se calcula a partir de la pérdida de superficie debida a los soportes de elevación y de una estimación de la pérdida de rendimiento causada por el sombreado, la distribución desigual del agua, la alteración del microclima y otros efectos ambientales que afectan al rendimiento y que son generados por la instalación agrivoltaica. La estimación de la reducción del rendimiento la puede realizar personal especializado cualificado.

7.2.4. Francia

El Programa Plurianual de Energía (PPE) [184] establece los objetivos periódicos de consumo y producción de energía para cumplir la Ley de Transición Ecológica [185].

En cuanto a la energía solar fotovoltaica, los objetivos de desarrollo han sido 20,1 GW para 2023 y de 35,1 a 44 GW para 2028. A finales de 2020, la capacidad solar instalada se acercaba a los 11 GW, ubicada principalmente en zonas de alto potencial (Provenza-Alpes-Costa Azul, Occitanie y Nueva Aquitania), de los cuales 4,4 GW están en suelo y 4,5 GW en tejados.

Los objetivos de desarrollo para 2028 son ambiciosos: para los tejados, se sitúan entre 14,5 a 19 GW, es decir, multiplicar por tres o por cuatro la potencia instalada. En cuanto a las instalaciones en suelo, los objetivos implican la instalación de 16 a 21 GW adicionales. Esto

implica una creciente ocupación del terreno por la energía solar. De hecho, sobre la base de la media de las centrales fotovoltaicas en suelo con una capacidad media de 1 MWp/Ha, el desarrollo de la energía solar previsto por el PPE podría requerir entre 16.000 ha y 21.000 ha de terreno adicional de aquí a 2028.

En la actualidad, las directrices marcadas llevan a los promotores de instalaciones fotovoltaicas a centrarse en terrenos artificiales (zonas no agrícolas, no forestales, no naturales), en particular antiguos emplazamientos industriales (vertederos, terrenos industriales abandonados, canteras, etc.). Sin embargo, debido a las dificultades para encontrar emplazamientos degradados aptos para centrales solares, algunos proyectos se centran en terrenos agrícolas (ventaja de las grandes superficies abiertas, seguridad de los terrenos, facilidad de implantación, etc.). La previsión de una utilización creciente de los terrenos agrícolas ha motivado que se contemple la agrivoltaica como una tipología innovadora. Este carácter innovador supone el acceso a las convocatorias de proyectos en una categoría distinta a las plantas fotovoltaicas convencionales.

La Agencia de Transición Ecológica (ADEME) dirige la definición y la redacción de las convocatorias de proyectos fotovoltaicos, mientras que la Comisión Reguladora de la Energía (CRE) recoge las ofertas y selecciona a los ganadores. Se han realizado cuatro convocatorias para la categoría de proyectos innovadores, en 2017, 2019, 2020 y 2021. La primera ronda incluyó 57 MWp, de los que solo se aprobaron 15 MWp para aplicaciones fotovoltaicas innovadoras en cultivos. La mayor parte de la capacidad se destinó a invernaderos fotovoltaicos y sólo el 11% a la agrivoltaica en campo abierto. En la tercera ronda se asignó una mayor capacidad a la agrivoltaica. En la última ronda de licitaciones, resuelta en enero de 2023, se asignaron 146,2 MWp, de los cuales 80 MWp correspondieron a la agrivoltaica. La empresa francesa Sun'Agri recibió unos 58 MWp y ganó 22 de 31 proyectos. El precio medio de adjudicación fue 84,46 €/MWh. ADEME evalúa las solicitudes en cada convocatoria, valorando el cumplimiento de una serie de requisitos:

- **Carácter innovador del proyecto**, demostrando la sinergia entre la producción fotovoltaica y la actividad agrícola. Se requiere el informe de un experto reconocido o de un centro de investigación para avalar la viabilidad y sostenibilidad del proyecto. Asimismo, el promotor del proyecto debe presentar un acuerdo de seguimiento con una organización científica o profesional para el seguimiento de la producción, debiendo reservar una zona de control con el mismo cultivo, pero exento de módulos fotovoltaicos, a efectos de comparar la influencia de la instalación fotovoltaica. Se presentarán informes anuales a ADEME.
- **Otros criterios:** calidad técnica, posicionamiento de la innovación en el mercado, aspectos medioambientales y sociales.

7.3.5. Massachussets (USA)

En el marco del programa SMART (Solar Massachusset Renewable Target), se contemplan los proyectos ASTGU (Agricultural Solar Tariff Generation Unit). La ayuda se concreta en una prima de 0,06 \$/kWh respecto al precio de ventas de la electricidad. Establece una serie de requisitos para optar a las ayudas:

- La instalación fotovoltaica no interferirá en el uso continuado del terreno bajo la cubierta para fines agrícolas.
- La instalación fotovoltaica estará diseñada para optimizar el equilibrio entre generación eléctrica y productividad de los suelos situados debajo.
- La instalación agrivoltaica es una estructura elevada que permite el continuo crecimiento de los cultivos bajo los paneles solares, con altura suficiente para todas las labores necesarias.
- El agricultor informará al servicio de extensión agraria sobre el cultivo y su compatibilidad con el diseño de la instalación solar en cuanto a porcentaje de luz solar, etc.
- Se deben presentar informes anuales sobre la productividad.

En cuanto al diseño de las instalaciones hay que cumplir:

- A. Parámetros de diseño del sistema:
 1. Requisitos de altura del panel
 - a) En el caso de las instalaciones de inclinación fija, la altura mínima del punto más bajo del panel será de 8 pies sobre el nivel del suelo.
 - b) En el caso de las instalaciones de seguimiento, la altura mínima del panel en su posición horizontal será de 10 pies sobre el nivel del suelo.
 2. Requisitos de reducción máxima de la radiación solar directa. Todas las instalaciones deben demostrar que la reducción máxima de la luz solar producida por el sombreado del panel en cada pie cuadrado de terreno situado directamente debajo, detrás y en las zonas adyacentes y dentro del diseño no será superior al 50% de las condiciones de campo de referencia.
 3. Temporada de crecimiento, consideraciones sobre la hora del día. Se considerará que la temporada de crecimiento típica es de marzo a octubre, con unas condiciones de horas de radiación solar con una reducción máxima del 50% entre las 10 de la mañana y las 5 de la tarde para marzo y octubre, y de 9 de la mañana a 6 de la tarde de abril a septiembre;
 4. Tamaño máximo. La potencia nominal máxima será de 2 MW.

De acuerdo con lo expuesto, se puede afirmar que en la actualidad existen dos modelos diferentes de evaluación y certificación de las instalaciones agrivoltaicas. Así, por un lado, se encuentra el modelo normativo seguido por Alemania e Italia mientras que, por otro lado, se encuentra el modelo de evaluación seguido en Francia. En base a estos modelos se determina si un sistema de uso dual del terreno puede considerar un sistema agrivoltaico y si, como tal, puede optar a las correspondientes ayudas de fomento para la implantación de este modelo productivo.

8. POTENCIAL DE DESARROLLO DE LA AGRIVOLTAICA EN ESPAÑA

8.1. Identificación de Zonas con Disponibilidad Nodos de Inyección a la Red Eléctrica

El Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica [186], la Circular 1/2021, de 20 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), por la que se establece la metodología y condiciones del acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica [187], y la Resolución de la CNMC por la que se establecen las Especificaciones de Detalle (ED) para la determinación de la capacidad de acceso de generación a la red de transporte y a las redes de distribución [188], constituyen la normativa de referencia para la evaluación de las capacidad de acceso en los nudos de la Red de Transporte y Distribución.

De acuerdo con esto, en este epígrafe se ha llevado a cabo un análisis de la totalidad de las subestaciones eléctricas pertenecientes a la red de distribución ya que se considera de especial relevancia esta información de cara a implementar una estrategia de incentivación de la tecnología agrivoltaica. Para hacer más comprensible este análisis, adjunto al presente informe, se incluye una serie de archivos informáticos que permiten consultar la información de forma interactiva mediante un SIG (Sistema de Información Geográfica) (Figura 36) o mediante Google Earth Pro, una herramienta de escritorio gratuita. El lector podrá acceder a dicha información escaneando el código QR que aparece en la Figura 36. Para cada subestación con capacidad de evacuación distinta de cero se incluye su localización geográfica, denominación, tensión de conexión (kV) y capacidad disponible (MW). En la Figura 37 se presenta una captura de pantalla de la aplicación Google Earth Pro. Haciendo clic sobre un icono cualquiera del mapa se muestra la información correspondiente a la subestación, denominación, tensión y capacidad disponible (Figura 38).

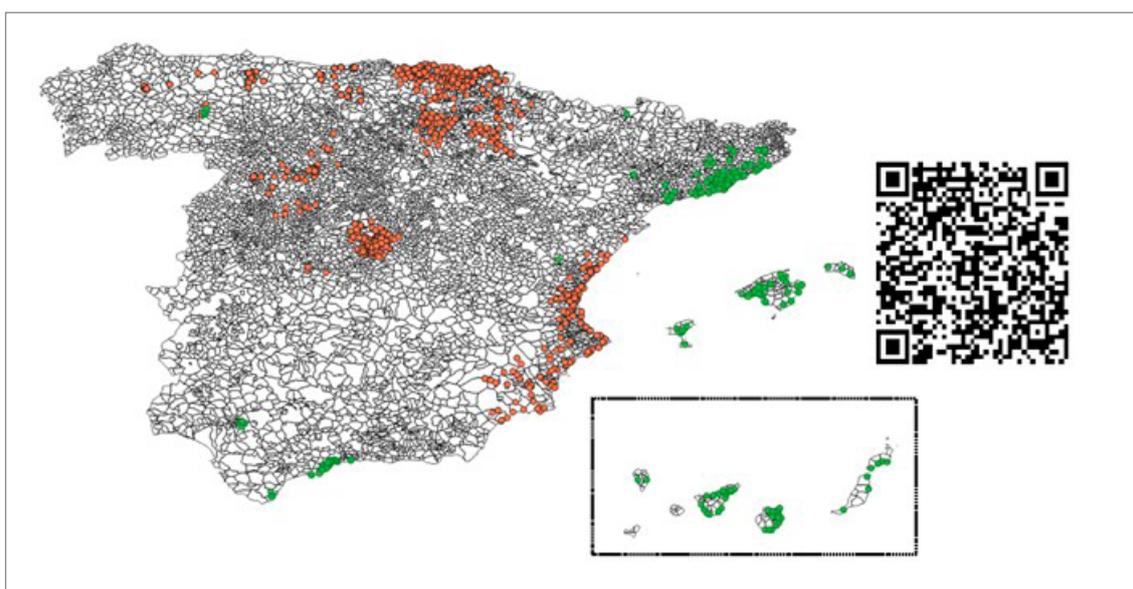


Figura 36. Captura de pantalla de Sistema SIG desarrollada para la consulta de información sobre nodos con disponibilidad de inyección

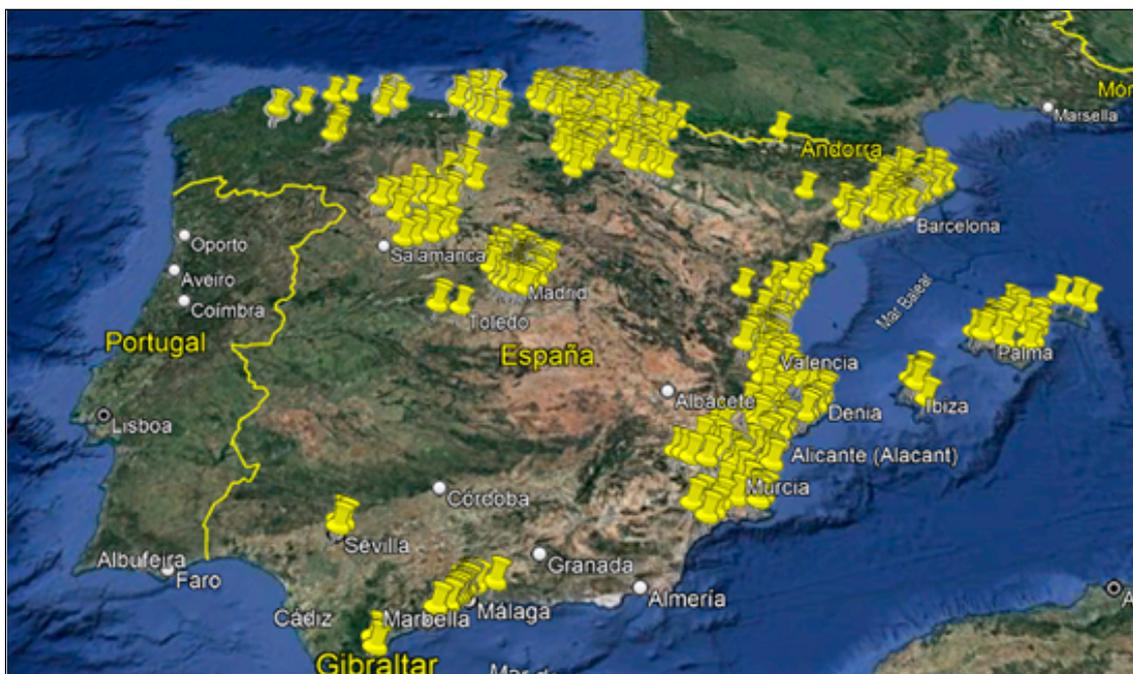


Figura 37. Captura de pantalla de la Aplicación Google Earth Pro desarrollada para la consulta de información sobre nodos con disponibilidad de inyección

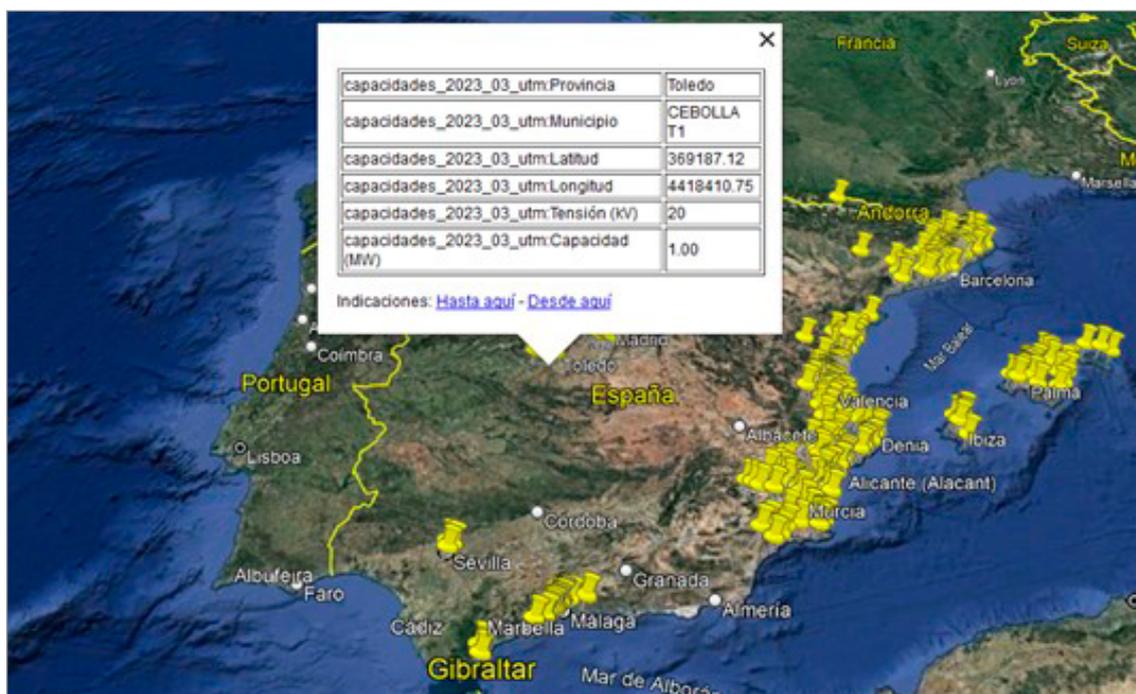


Figura 38. Aplicación Google Earth Pro desarrollada para la consulta de información sobre nodos de inyección: Información detallada de subestación con disponibilidad de inyección

Tabla 9. Capacidad de conexión en MW a la red de distribución por provincias.

Fuente: Elaboración propia.

PROVINCIA	CAPACIDAD (MW)	PROVINCIA	CAPACIDAD (MW)	PROVINCIA	CAPACIDAD (MW)
ALAVA	918,52	GRANADA	0	LAS PALMAS	946,6
ALBACETE	0	GUADALAJARA	0	PONTEVEDRA	574,4
ALICANTE	2412,17	GIPUZKOA	7486	SALAMANCA	4
ALMERIA	0	HUELVA	0	S. C. TENERIFE	807,5
AVILA	7	HUESCA	23	CANTABRIA	318,1
BADAJOS	0	JAEN	0	SEGOVIA	0
ILLES BALEARS	2077,1	LEON	59,7	SEVILLA	295
BARCELONA	17949,2	LLEIDA	53,4	SORIA	0
BURGOS	67,22	LA RIOJA	167,38	TARRAGONA	395,5
CACERES	0	LUGO	15	TERUEL	11,1
CADIZ	292,2	MADRID	14332	TOLEDO	6
CASTELLON	982,45	MALAGA	3200,5	VALENCIA	6390,5
CIUDAD REAL	0	MURCIA	94,02	VALLADOLID	693,5
CORDOBA	0	NAVARRA	1208	BIZKAIA	8171
A CORUÑA	197,2	OURENSE	28,3	ZAMORA	118,3
CUENCA	0	ASTURIAS	1256,83	ZARAGOZA	0
GIRONA	1360,8	PALENCIA	175,8		

La Tabla 9 muestra, a modo de resumen, la capacidad disponible a la fecha de elaboración de este informe, agrupada por provincias. Como se puede deducir de la Tabla 9 y, sobre todo, de los mapas temáticos incluidos en este trabajo, la práctica totalidad de las zonas susceptibles de implementación de proyecto agrivoltaicos no disponen de capacidad de acceso a la red. Esta circunstancia condiciona la viabilidad de las iniciativas encaminadas a fomentar esta tecnología.

Para revertir esta situación y posibilitar la consecución de los objetivos de impulso de las energías renovables, se ha puesto en marcha el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021-2026 [189]. Dicho Plan consta de una primera planificación vinculante que se refiere a la ejecución de las actuaciones en la red de transporte conforme a lo establecido en la Orden TEC/212/2019 [190] y una segunda, planificación indicativa que contempla el escenario objetivo para la consecución de los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima [11].

De esta forma, entre sus principales objetivos, este plan contempla un diseño de la red de transporte de energía que permita la integración masiva de nueva generación renovable. Para ello, entre marzo de 2019 y marzo de 2022 se desarrolló el plan establecido en la Orden TEC/212/2019 de acuerdo con las siguientes fases:

- **Fase de propuestas (3 meses):** Las comunidades autónomas y los interesados en el sector presentaron propuestas de desarrollo de la red de transporte al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) y a Red Eléctrica de España (REE).
- **Fase de estudios (6 meses):** A continuación, REE, siguiendo los criterios del MITERD, elaboró una propuesta inicial basada en los correspondientes estudios técnicos de las propuestas recibidas.
- **Fase de alegaciones:** Se recogieron alegaciones a la Propuesta Inicial de Desarrollo de la Red de Transporte 2021-2026, junto con una consulta pública del Estudio Ambiental Estratégico. A continuación, la CNMC evaluó positivamente la propuesta inicial y realizó recomendaciones.
- **Segunda fase de estudios (2 meses):** REE elaboró la Propuesta de Desarrollo de la Red de Transporte a partir de las consideraciones y criterios del MITERD.
- **Fase de consolidación:** Tras analizar alegaciones y recomendaciones, la propuesta se consolidó en el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte, con una Declaración Estratégica emitida por el MITERD.
- **Fase de aprobación:** Finalmente, el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de energía eléctrica 2021-2026 se envió al Consejo de Ministros para su aprobación.

La Figura 39 muestra las propuestas presentadas en función del tipo de actuación mientras que la Figura 40 muestra la localización de las zonas con mayor potencial de generación y que han condicionado la selección de las actuaciones.

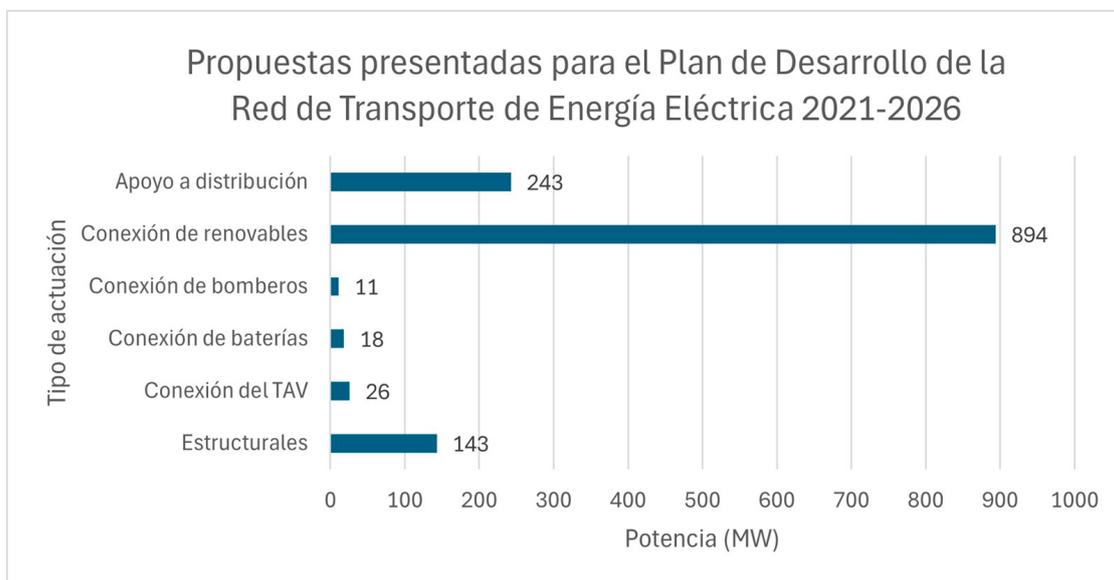


Figura 39. Propuestas presentadas para el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021-2026 en función del tipo de actuación [189]

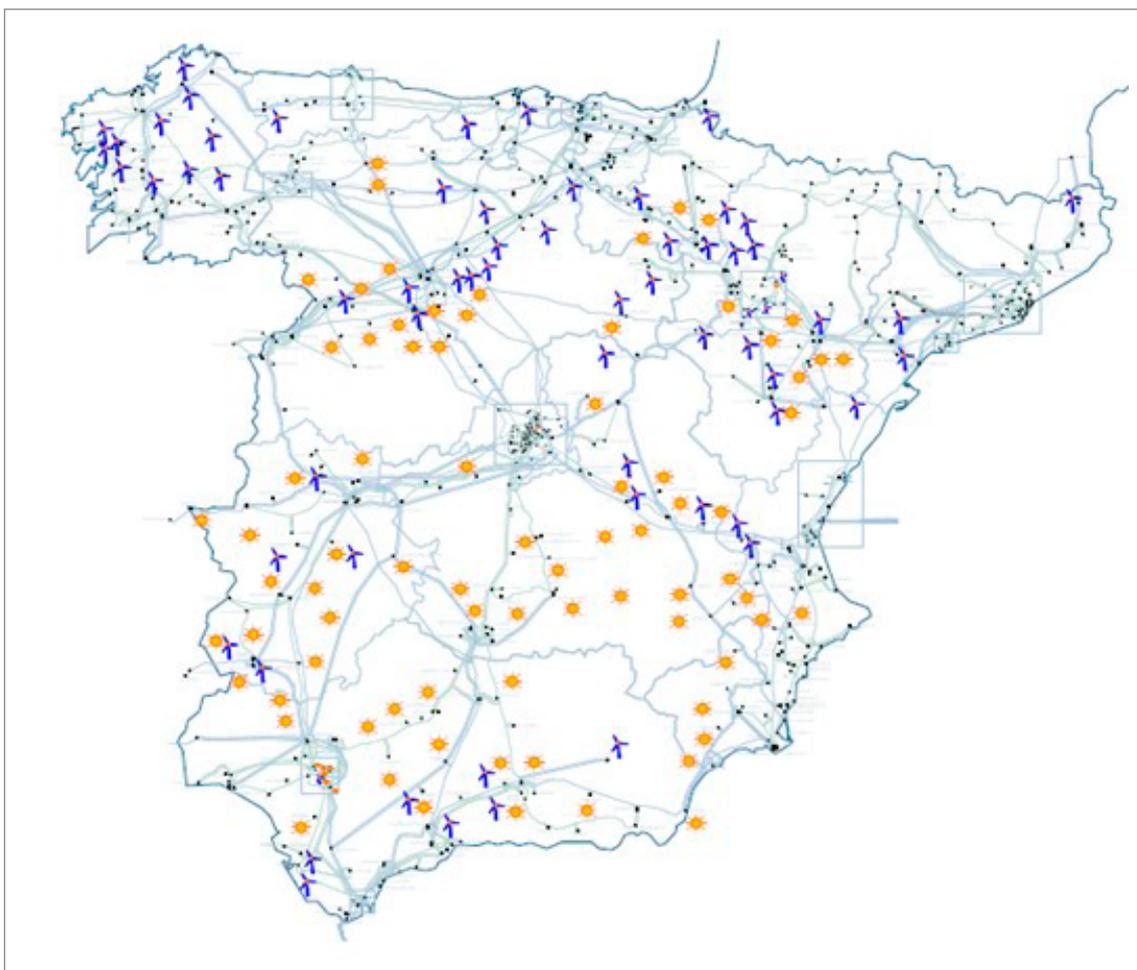


Figura 40. Ubicación de nueva generación renovable en el escenario de estudio. Sistema peninsular [189]

8.2. Identificación de Cultivos con Potencial Agrivoltaico en España

En este epígrafe se intenta identificar cultivos con potencial agrivoltaico en España. Para ello, se han cruzado los datos de la Tabla 1, en la que se muestra un listado de los principales cultivos en España y su rendimiento, con la información de la Tabla 2, en la que se muestra sistemáticamente los resultados de los diferentes estudios experimentales sobre cultivos agrivoltaicos. De acuerdo con esto, la Tabla 10 muestra los cultivos con potencial agrivoltaico en España. A este respecto, es importante señalar que, como ya se ha expuesto anteriormente, los resultados de los estudios considerados tienen un marcado carácter local ya que el comportamiento de los cultivos depende en gran medida de las condiciones climatológicas del emplazamiento. Además, los resultados de estos estudios no son concluyentes en cuanto que no abarcan periodos de tiempo de experimentación suficientemente largos como para considerar la variabilidad del clima en el lugar de estudio. Sin embargo, a falta de estudios científicos desarrollados en plantas agrivoltaicas experimentales en el territorio español, esta información puede considerarse válida como punto de partida, si bien es necesario realizar estudios concretos que validen los resultados en nuestro entorno y evalúen el comportamiento de otros cultivos de alto valor que son clave en el sistema agrícola español.

Tabla 10. Posibles cultivos con potencial agrivoltaico en España

CULTIVO	OBSERVACIONES	REF
TRIGO BLANDO	Se observan reducciones en el rendimiento del 4% para tasas de sombreado bajas, que van aumentando incluso hasta el 25%. Sin embargo, en condiciones de climatológicas especialmente calurosas, la rentabilidad del cultivo aumenta	[70,125]
MAIZ	Se observa que la rentabilidad aumenta en sistemas agrivoltaicos con aja densidad de colectores si bien disminuye cuando la densidad de colectores aumenta	[126,127]
PATATA	Existen resultados contradictorios en relación con la variación de la rentabilidad del cultivo agrivoltaico de la patata. Sin embargo, se comprueba que en condiciones de altas temperaturas el sombreado beneficia al cultivo aumentando su rentabilidad	[70,129]
VIÑA	La rentabilidad de la viña aumenta hasta el 25% bajo condiciones de sombreado del 36% pero disminuye en un 25% cuando dicha tasa de sombreo aumenta (66%) Asimismo, se observa que el proceso de aceleración de la maduración de la uva, consecuencia del cambio climático, se ralentiza gracias al sombreado de los colectores solares en sistemas agrivoltaicos evitando que el fruto madure en condiciones secas y calurosas propias del verano	[45,75,111,112,118-120]

Asimismo, es importante destacar que, tal y como se recoge en la literatura científica, se ha comprobado que existen cultivos que, en condiciones de calor intenso y seco, mejoran su rentabilidad gracias a la protección de los paneles frente a la irradiación solar incidente [43,65,79]. Este resultado es especialmente relevante en el contexto de nuestro país ya que, gran parte de los terrenos agrícolas del mismo, están sometidos a elevados niveles de radiación solar y altas temperaturas durante gran parte del año. Por ello, sería conveniente evaluar el potencial de protección de los colectores solares frente a la irradiación solar para los principales cultivos que se producen en España.

Por otro lado, si bien no existen estudios específicos que aborden la variación en la rentabilidad en cítricos y frutales típicos de nuestro entorno (manzano, naranjo, etc.), sería interesante comprobar si, tal y como recoge la bibliografía científica, estos cultivos se ven beneficiados de la protección de los colectores solares cuando son cultivados en sistemas agrivoltaicos.

Finalmente, Casares et al. [74] simularon el comportamiento y la disponibilidad de la irradiación solar en un sistema agrivoltaico interespacial con cultivo de olivar superintensivo en seto en las calles entre las filas de colectores solares con seguidores solares. En este estudio se comprueba que, con una adecuada estrategia de seguimiento solar, el LER de este tipo de planta agrivoltaica puede aumentar entre un 30.5% y un 49%. De acuerdo con esto y dada

la relevancia del olivar en nuestro país, sería importante validar experimentalmente este resultado y concretar los efectos del sombreado sobre el rendimiento de este cultivo.

8.3. Instalaciones Agrivoltaicas en España

Llegados a este punto, resulta interesante identificar aquellas instalaciones en España que se autodenomina agrivoltaicas. Una búsqueda intensiva realizada en Google ha dado lugar a relación que se recoge en la Tabla 11.

Tabla 11. Instalaciones en España autodenominadas como agrivoltaicas

	NOMBRE	UBICACIÓN	PROMOTOR	USOS/CULTIVOS
1	Augusto (50MW, 185ha)	Badajoz	CTAEX	Berenjena, brócoli, coliflor, calabacín, junto con especies leguminosas como la alfalfa
2	Las Corchas (50MW, 143ha)	Carmona (Sevilla)	CTAEX	3 ha de aromáticas 30 colmenas
3	Valdecaballeros (42,8 MW, 100 ha)	Casas de Don Pedro y Talarrubias (Badajoz)	CTAEX	Pradera para aprovechamiento animal y plantas aromáticas y medicinales para uso cosmético y curativo
4	Flota Los Álamos (84,2MW, 70 ha)	Totana (Murcia)	IMIDA	Ha de pimiento rojo, brócoli, alcachofa, tomillo y pitaya
5	Viñedos del Río Tajo (40 kW, inferior a 1ha)	Guadamur, Toledo		Viña de vinificación
6	Baywa R.E	Alhendín (Granada)	UCO y UPM	10ha Cereal y leguminosas
7	Huerto Carrasco Tornasol (0,9 MW)	Fuentealbilla (Albacete)		Viñedo preexistente
8	Huerto Los Hitos Tornasol (1.8,9 MW)	Fuentealbilla (Albacete)		Ciruelos
9	Huerto solar de Picassent, INDEREN (60 kW)	Picassent (Valencia)		Invernaderos con pitaya y aguacate
10	Invernaderos El Coronil (1MW)	El Coronil (Sevilla)		Setas y Pitaya para explotación comercial
11	Invernaderos Castilblanco	Castilblanco(Sevilla)		

A continuación, se describen dichas instalaciones.

- **Instalaciones 1, 2, 3 y 4 [191–193]:** Se tratan de proyectos de centrales fotovoltaicas convencionales, la mayor parte de ellos con seguidores de eje horizontal en dirección N-S, en los que no existe modificación alguna en el diseño de la planta ni su modo de operación en función de criterios agronómicos. El pastoreo con ovejas se propone como método de siega. En cuatro de ellas se han dispuesto subparcelas de pequeña extensión (entre 3 y 10 ha) para ensayos de cultivos de hortalizas y pitaya. En el caso de Las Corchas (Carmona) se ha dispuesto un pequeño apiario de carácter demostrativo. En estos ensayos han participado CTAEX e IMIDA. Si bien algunos ensayos han concluido, de momento no se ha podido identificar publicación alguna en la que se recojan las conclusiones de estos ensayos. La pequeña proporción de superficie dedicada a la actividad agrícola, así como la falta de plan de explotación agrícola hace que ninguna de estas plantas pueda recibir la cualificación de planta agrivoltaica bajo ninguno de los estándares publicados.
- **Instalación 5:** Se trata de una instalación fotovoltaica (40 kW) instalada sobre un viñedo preexistente. El viñedo se cultiva en setos N-S separados 4 m entre sí. Se han dispuesto tres seguidores solares N-S de 30 m de largo sustituyendo a líneas de cultivo (Figura 41). Los seguidores se han espaciado entre sí de modo que entre dos de ellos permanecen 4 líneas de cultivo. El sistema se ha dotado de monitorización, mediante Inteligencia Artificial, con objeto de poder bajar la temperatura del cultivo 2°C aproximadamente. La energía eléctrica se utiliza para el autoconsumo de una bodega asociada a la explotación.



Figura 41. Instalación Agrivoltaica de Iberdrola [Imágenes cedidas por Iberdrola]

- **Instalación 6:** Se trata de una instalación en fase de construcción con uso compartido del terreno en una porción de terreno de una planta fotovoltaica de 50 MW con colectores solares fijos en alineaciones Este-Oeste. En la parcela agrivoltaica, que ocupará una superficie de 10 ha, se cultivará entre los colectores de manera que las calles entre módulos se han dimensionado en función de las cosechadoras de cereal. Los agentes de esta instalación son un promotor fotovoltaico (Baywa R.E.) y un agricultor local, aunque, aún no se ha definido el modelo contractual de explotación.
- **Instalación 7:** Se trata de una instalación de 0,9 MW realizada sobre un viñedo preexistente de 6,6 ha que se respetó (Figura 42). Los módulos fotovoltaicos se dispusieron sobre 180 seguidores de dos ejes. Esta instalación desarrollada por Tornosol en 2007 nació con la vocación de desarrollar un tipo de instalación fotovoltaica que no supusiese una irrupción brusca en el paisaje.



Figura 42. Instalación de Huerto Carrasco, Fuentealbilla (Albacete)

- **Instalación 8:** Se trata de una instalación de 1,8 MW realizada juntamente con una plantación de ciruelos de 13,1 ha (Figura 43). Los módulos fotovoltaicos se dispusieron sobre 180 seguidores de dos ejes. También, desarrollada por Tornosol, comparte múltiples características con Huerto Carrasco, de la que la separa una distancia inferior a un kilómetro.



Figura 43. Instalación de Huerto del Hito, Fuentealbilla (Albacete)

- **Instalación 9:** Se trata de una instalación de 50 kW realizada sobre un invernadero de 400 m² construido exprofeso para el cultivo de pitaya y aguacate (Figura 44). La empresa promotora, Inderen, ha creado una línea de crecimiento agrivoltaico. Actualmente en conjunción con Tranesol, está promocionando la creación de una comunidad energética agrivoltaica.



Figura 44. Instalación Picassent Solar (Valencia)

- **Instalación 10:** Invernadero solar de 26.000 m² de superficie, construido en 2011. Los colectores fotovoltaicos se sitúan en los aleros orientados al Sur de su cubierta (Figura 45). Se trata de una planta de 1MW. La explotación se ha dedicado a vivero de planta de interior y pitaya.



Figura 45. Instalación del tipo proyectado por WSP en El Coronil (Sevilla)

Si bien, en la actualidad sólo se han podido identificar estas 10 instalaciones agrivoltaicas en España, existen diferentes iniciativas puestas en curso por entidades como IRTA (cita), Repsol +Telefónica, Endesa, Iberdrola y EMV [192,194–197]. Esta situación apunta al hecho de que la agrivoltaica en España actualmente es muy limitada y la mayor parte de las experiencias son recientes. Además, gran parte de las instalaciones priorizan la producción eléctrica sobre la agrícola, sin que se dispongan datos ni indicadores, más allá de los utilizados en sus webs divulgativas.

8.4. Posibles Impactos Económicos, Técnicos, Sociales y Medioambientales de la Agrivoltaica en España.

La implantación de la agrivoltaica en España puede traer consigo importantes impactos para el medioambiente, la economía del país y la sociedad en general.

Así, por un lado, por lo que respecta a los beneficios para el medioambiente, la agrivoltaica promueve la producción de energía mediante tecnología fotovoltaica renovable, fomentando así la transición energética hacia un nuevo modelo energético basado en energías limpias que reduzcan las emisiones y contribuyan a la lucha contra el cambio climático y a la mejora de la calidad ambiental y, por tanto, al bienestar de la población [52,58,65].

Por otra parte, diversos estudios han demostrado que la agrivoltaica contribuye a optimizar el rendimiento económico de las tierras agrícolas [50,55–57,72,79]. De acuerdo con esto, el sector agrícola, tan importante para la economía de nuestro país, se beneficiaría de la implantación de la agrivoltaica, ya que optimizaría la productividad de las tierras, añadiendo a los beneficios directos de la agricultura los de la venta de energía. Además, al diversificar la fuente de ingresos, se reduciría el riesgo financiero y la dependencia de los ingresos de las condiciones meteorológicas [43,57]. Con todo ello, el sector agrario experimentaría una mejora en la actual situación de crisis de precios que viene sufriendo en los últimos tiempos, Por tanto, además de promover un nuevo modelo de agricultura sostenible, la agrivoltaica puede ser una solución complementaria para paliar la crisis de precios que el sector agrario está sufriendo en los últimos tiempos, consiguiendo así mejorar la competitividad, el desarrollo tecnológico y la productividad de este sector estratégico en nuestro país.

Además, la agrivoltaica contribuye a mantener la mano de obra agrícola en las zonas rurales o incluso a recuperarla en aquellos terrenos en los que ya existen grandes plantas fotovoltaicas conectadas a red que puedan reconvertirse en plantas agrivoltaicas. Asimismo, la implantación de los sistemas de generación fotovoltaicos en los terrenos agrícolas generaría también empleo relacionado con la construcción, mantenimiento y gestión de los sistemas de producción energética. De esta forma, gracias al empleo generado, se contribuye a mantener la economía de las zonas rurales y a combatir el despoblamiento de las mismas [44–46,53].

De acuerdo con todo lo expuesto, la agrivoltaica consigue dar respuesta a algunas de las críticas que recibe el sector fotovoltaico, como son: i) el conflicto por el suelo entre esta tecnología y la producción de alimentos y ii) la eliminación de mano de obra agrícola en las zonas rurales donde se dedican terrenos agrícolas a grandes instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red. De esta forma, se contribuye a mejorar la visión sobre esta tecnología de determinados sectores de la sociedad.

Finalmente, la agrivoltaica ayuda a los países a alcanzar su autonomía energética y alimentaria reduciendo la dependencia internacional lo que, tal y como se ha puesto de manifiesto con la guerra de Ucrania, puede tener efectos negativos sobre la economía y la política de la nación cuando los intereses de los países involucrados en el intercambio no están alineados [59].

9. CONCLUSIONES

La agrivoltaica o uso compartido del terreno para producción agrícola y de energía fotovoltaica [47] se presenta como posible solución a algunos de los grandes retos de la sociedad. Concretamente, la agrivoltaica permite satisfacer simultáneamente la creciente demanda de alimentos y energía, motivada por el crecimiento de la población mundial. Además, lo hace de una manera sostenible, fomentando simultáneamente la producción de energías renovables y el avance de la agricultura hacia un modelo más eficiente y amigable con el medio ambiente [65]. Por tanto, la agrivoltaica, en línea con el Pacto Verde para el Clima [3], contribuye positivamente a la lucha contra el Cambio Climático [52,58]. Además, al tratarse de un modelo que compatibiliza la producción fotovoltaica y de alimentos, supone una baza para paliar el conflicto por el uso del terreno [43,51,52] y eludir los posibles riesgos derivados de la conversión de terreno agrícola en plantas fotovoltaicas [33,34,43–46,53].

De acuerdo con la disposición espacial relativa entre el sistema fotovoltaico y el cultivo, los sistemas agrivoltaicos pueden clasificarse en sistemas interespaciales, sistemas elevados e invernaderos agrivoltaicos (*ver epígrafe 2.2.*). Así, los invernaderos agrivoltaicos se construyen mediante la instalación de módulos fotovoltaicos sobre la cubierta (Figura 17). De esta forma, los paneles protegen a los cultivos de invernadero de los altos niveles de radiación PAR que suelen recibir en los meses de verano, especialmente en los países de clima mediterráneo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos colectores pueden reducir aún más los bajos niveles de irradiancia que estos mismos cultivos reciben en invierno. Consecuentemente, los invernaderos agrivoltaicos han quedado limitados, por el momento, a cultivos con bajas necesidades de radiación solar siendo necesario estudiar en profundidad estos sistemas en busca de una solución más equilibrada.

Por otra parte, como su nombre indica, en un sistema agrivoltaico elevado los paneles fotovoltaicos se instalan sobre estructuras elevadas (entre 2 y 6 m de altura) de manera que se puedan realizar las labores agrícolas necesarias para el mantenimiento del cultivo plantado bajo los mismos (Figura 6). Frente a estos, en las instalaciones agrivoltaicas interespaciales, las estructuras sobre las que se disponen los colectores solares no se elevan, sino que mantienen una altura similar a la de las plantas fotovoltaicas convencionales, si bien el ancho de las calles entre colectores, utilizadas para el cultivo agrícola, se amplía para permitir el paso de la maquinaria agrícola y el desarrollo de las labores agrícolas.

De esta forma, en los sistemas elevados los colectores solares apenas restan espacio al terreno disponible para el cultivo, lo que repercute en un mayor nivel de conservación de la producción agrícola y la biodiversidad [43]. Sin embargo, el coste de las estructuras soporte para los paneles fotovoltaicos en altura es muy elevado dificultando la rentabilidad de la instalación. Además, es necesario tener en cuenta los mayores requerimientos de cimentación

en este tipo de instalaciones que afectan no sólo al coste de la instalación de nuevo, sino que también podrían repercutir en la fertilidad del suelo dependiendo de la técnica de cimentación empleada. Por todo ello, es necesario considerar estos condicionantes a la hora de elegir entre agrivoltaica elevada e interespacial y evaluar adecuadamente la rentabilidad de la inversión inicial, en función del valor del cultivo.

Si bien en las experiencias desarrolladas en otros países y documentadas en la literatura científica, es común que los sistemas interespaciales se destinen a cultivos herbáceos y los sistemas elevados a horticultura, viña y frutales, no existe restricción alguna documentada que indique que esto deba establecerse como una norma o recomendación, siendo necesario avanzar en la caracterización del comportamiento de ambos sistemas con los diferentes cultivos más relevantes en nuestro país mediante estudios experimentales y experiencias piloto.

En cualquier caso, es necesario tener en cuenta la interacción entre ambos sistemas productivos y la irradiancia solar buscando, ya sea mediante la orientación de los colectores solares o mediante la disminución de su densidad espacial, que los niveles de radiación incidente sobre el cultivo sean adecuados para el mismo (en intensidad y homogeneidad). Para ello, resulta fundamental tener en cuenta el punto de saturación de la luz del cultivo, esto es, sus necesidades de irradiancia solar para la fotosíntesis (*ver epígrafe 3.2.*) [43].

En este sentido, por lo que respecta a los cultivos (*ver epígrafe 3.2.*) es importante señalar que los resultados experimentales obtenidos hasta el momento no pueden considerarse concluyentes, ya que no se han extendido durante intervalos de tiempo suficientemente largos, ni extrapolables universalmente, ya que el comportamiento de los cultivos depende en gran medida de las condiciones climatológicas y geográficas del lugar [133].

Teniendo en cuenta estos condicionantes, la literatura científica [45,61,65,72,79,81,99,118–120] recoge estudios experimentales que demuestran que los cultivos más adecuados para la agrivoltaica son aquellos más tolerantes a la sombra como los frutos rojos, las verduras de hoja (lechuga, espinacas, acelga, etc.), las Brassicas (col, brocoli, coliflor, etc.) o las hortalizas de raíz (zanahoria, remolacha, rábanos, etc.) y tubérculos (patata), si bien su crecimiento en condiciones de sombra podría ser más lento que en cultivo convencional a pleno sol [79,108]. En cualquier caso, se comprueba que el rendimiento del cultivo depende del porcentaje de sombra proyectada por los colectores solares sobre el cultivo, lo que viene a reforzar la necesidad de encontrar un equilibrio entre ambos sistemas productivos que no se base en criterios meramente económicos, sino que se proteja la producción agrícola.

Por otra parte, algunos estudios han demostrado que la agrivoltaica puede resultar muy beneficiosa para el cultivo de la vid (Figura 16) ya que la protección de los colectores solares frente a la irradiancia solar frena el aceleramiento del desarrollo fenológico de la planta que se viene observando como consecuencia del Cambio Climático [45,111,112,118–120] y que resulta perjudicial para su producción. De acuerdo con esto, la vid podría ser un cultivo con un elevado potencial agrivoltaico en nuestro país, dado las altas extensiones de terreno de nuestro territorio dedicado a su cultivo.

Similarmente, algunos estudios experimentales recogidos en la literatura científica señalan otros cultivos importantes de nuestro país potencialmente adecuados para su cultivo

agrivoltaico como el trigo [70,125], el maíz [126,127] y la patata [70,129]. Finalmente, por lo que respecta a los cultivos más importantes de nuestro país con potencial agrivoltaico, si bien no existen estudios publicados en los que se haya analizado experimentalmente el comportamiento agrivoltaico del olivar, sí existen estudios de simulación que evidencian que puede considerarse un cultivo adecuado para este nuevo sistema productivo consiguiendo aumentar el LER de la explotación entre un 30 y un 49% [74].

Más allá del cultivo en concreto, se ha comprobado que la sombra de los colectores en los sistemas agrivoltaicos beneficia a los cultivos en condiciones extremas de calor y sequía [54,65,70,73,79,81] lo que lleva a pensar que la agrivoltaica puede fortalecer a la agricultura frente a las consecuencias negativas del cambio climático [43,54,70], siendo este beneficio especialmente relevante en nuestro país.

Y es que, desde el punto de vista agrícola, los paneles fotovoltaicos proporcionan protección a los cultivos frente a altos niveles de irradiación solar, elevadas temperaturas [50,54,65,70,71,80] e incluso frente a fenómenos meteorológicos adversos como el granizo o el viento [43,68]. Además, la reducción de la irradiación solar y la temperatura en el terreno de cultivo (*ver epígrafe 3.1.*), consecuencia de las sombras de los colectores [97], disminuye el consumo de agua por evapotranspiración (*ver epígrafe 3.1.*) [65,79,81], lo que beneficia al balance hídrico del suelo [54,73] puede resultar especialmente beneficioso en situaciones de sequía, fortaleciendo a la agricultura frente a las consecuencias del Cambio Climático [43,54,70].

Finalmente, desde el punto de vista económico, la agrivoltaica ayuda a aumentar los ingresos globales de los agricultores al sumar los beneficios agrícolas y energéticos [50,55–57,72,79]. Además, se diversifican las fuentes de ingresos a la vez que se disminuye su dependencia respecto a la climatología [43,57]. Con todo ello, la agrivoltaica puede ayudar a paliar los efectos de la crisis que el sector viene experimentando en los últimos tiempos.

Como consecuencia de todas estas ventajas, existe un creciente interés a nivel mundial por la agrivoltaica. Fruto de este interés, se está impulsando el desarrollo de tecnologías específicas para este nuevo modelo productivo dual (*ver epígrafe 4.*) entre las que cabe destacar: i) materiales adecuados para los paneles fotovoltaicos que permitan un mayor nivel de incidencia solar en el cultivo; ii) estructuras de soporte de colectores específicas para sistemas agrivoltaicos; iii) seguidores solares con estrategias de seguimiento que regulen la incidencia de la irradiación solar sobre el cultivo en función de sus necesidades y iv) sistemas de Inteligencia Artificial que permitan conocer en cada momento el estado del cultivo agrivoltaico y controlen un funcionamiento del sistema fotovoltaico adaptado a las necesidades del cultivo.

Asimismo, en los últimos años, diversos países (Japón, China, Holanda, Alemania, Italia, Francia, Estado de Massachusetts en EE. UU., Corea del Sur, India, Israel) vienen desarrollando programas gubernamentales que, en mayor o menor medida, apoyan y fomentan la agrivoltaica (*ver epígrafe 7.2.*). En este contexto, dado el elevado número de horas de sol en España, el importante papel de la agricultura en el PIB del país y la amenaza que para dicho sector puede suponer una expansión de la fotovoltaica basada únicamente en criterios económicos y energéticos, resulta fundamental que se haga lo propio en nuestro país y que se desarrolle un plan de fomento de la agrivoltaica, que proteja al sector agrícola a la vez que apoye la generación de energía renovable.

En este contexto, es necesario señalar que la implementación real de la agrivoltaica en España se enfrenta a una importante limitación: la saturación de la capacidad de evacuación a la red eléctrica. Y es que, tal y como se ha evidenciado en este estudio prospectivo (*ver epígrafe 8.1.*), la práctica totalidad de las zonas agrícolas en las que se podrían desarrollar instalaciones agrivoltaicas no disponen de capacidad de acceso a la red. Por ello, la viabilidad y el futuro de la agrivoltaica en nuestro país dependen de las políticas de apoyo a la agrivoltaica que se incluyan en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima que tiene por objetivo la mejora de la red de transporte de energía eléctrica para favorecer la contribución de las renovables al mismo.

Asimismo, es conveniente definir un marco normativo y legislativo que regule la definición de agrivoltaica en España a través de la que se asegure el mantenimiento y la preponderancia de la actividad agraria frente a la producción energética que habría de ser un complemento a la primera, pero no a la inversa. Para ello, resulta conveniente definir un sistema de indicadores, similar a los desarrollados en Alemania (*ver epígrafe 7.2.3.*) o Italia (*ver epígrafe 7.2.2.*), que permita identificar aquellas instalaciones que realmente se puedan denominar agrivoltaicas. De esta forma, entre dichos indicadores (*ver epígrafe 5.2.*) cabe destacar: el rendimiento de la producción agrícola, el rendimiento energético, el Land Equivalente Ratio (LER) o comparativa de ambos rendimientos combinados frente al rendimiento del terreno ante un uso exclusivo agrícola o energético, el Ground Cover Ratio (GCR) relacionado con la densidad espacial de colectores solares y, por tanto, el porcentaje de sombreado, el ahorro del agua así como otros indicadores económicos que permitan evaluar la rentabilidad de los sistemas (Price Perform Ratio, Levelized Cost of Energy, Valor Actual Neto, Tasa Interna de Rendimiento).

Finalmente, resulta prioritario avanzar en el conocimiento científico del comportamiento de la agrivoltaica en nuestro entorno mediante el desarrollo de experiencias piloto que experimenten con distintos cultivos y tecnologías fotovoltaicas. De esta forma, los resultados de estas experiencias piloto permitirán avanzar hacia una definición de la agrivoltaica adecuada a las características de nuestro territorio y que favorezca la optimización de este nuevo modelo de uso dual del terreno.

10. RECOMENDACIONES

Para finalizar, en este epígrafe se esbozan las principales recomendaciones de los autores para establecer unas líneas de actuación que marquen el inicio de incentivación y del sector de la agrivoltaica en España. Es importante recordar que, tal y como se justificó en la introducción de este informe, en esta primera fase de impulso de la agrivoltaica conviene centrarse en aquellos sistemas agrivoltaicos que combinan la producción fotovoltaica y agrícola, dejando la inclusión del sistema ganadero para fases posteriores, tal y como se está haciendo en la mayoría de las iniciativas gubernamentales de apoyo a la agrivoltaica a nivel mundial.

Recomendación 1: Establecer un marco normativo al modo que ha realizado Alemania o Italia donde se establezcan las condiciones explícitas para que el uso dual de la tierra de cultivo sea real y efectivo, evitando la “pseudo-agricultura”. En esta normativa sería conveniente definir la actividad agrivoltaica como uso dual de la tierra para producción agrícola y eléctrica, siendo la actividad agrícola la predominante.

Así, en el cuerpo de la normativa sería conveniente establecer condiciones específicas que garanticen que el uso agrícola del terreno sea el prevalente. Para ello, sería adecuado el establecimiento y vigilancia de dos indicadores esenciales: *i) indicador de ocupación de los colectores fotovoltaicos en la explotación agraria* y *ii) indicador de productividad agraria*. En esta dirección, en el caso de Alemania, por ejemplo, se establece que la pérdida de superficie utilizable para la agricultura debida a las estructuras y subestructuras no debe superar el 10% de la superficie total del proyecto en los casos de agrivoltaica elevadas y el 15% para la categoría dedicada al cultivo interespacial. A esta condición se le añade que el rendimiento productivo no decaiga por debajo del 66% respecto del correspondiente a las condiciones del terreno antes de la implantación.

Asimismo, dentro de este marco sería indicado definir las tipologías de sistemas agrivoltaicos, así como las dimensiones que permitan la mecanización agrícola. Igualmente, sería adecuado establecer los estándares de estructuras, dimensiones, métodos y programas informáticos de cálculo.

Finalmente, se considera conveniente regular las condiciones de mantenimiento del carácter agrícola de las instalaciones agrivoltaicas: mantenimiento de los beneficios y ayudas establecidos por la PAC, mantenimiento de la compatibilidad del nuevo uso con el mantenimiento del regadío, mantenimiento de los derechos de arranque y renovación de cultivos. Igualmente se recomienda extender los procedimientos de autorización de las plantas fotovoltaicas a las plantas agrivoltaicas en lo relativo a las autorizaciones medioambientales y procedimientos de declaración de interés general y utilidad pública de instalaciones de transporte eléctrico.

Recomendación 2: Sería positivo crear una entidad administrativa de referencia especializada en Agrivoltaica para consulta, divulgación y evaluación de solicitudes. Así, por ejemplo, por lo que respecta a las acciones divulgativas esta entidad podría trasladar a la sociedad el concepto agrivoltaico como un modelo de expansión de la fotovoltaica a través de un uso predominantemente agrícola, respetuoso con el paisaje rural, con diferentes hábitats y garante de la seguridad alimentaria, lo que facilitaría la aceptación social del modelo agrivoltaico e, indirectamente, de la expansión de la energía solar fotovoltaica.

Asimismo, dicha entidad podría crear programas de formación, así como una primera red de instalaciones agrivoltaicas con carácter demostrativo, formativo e investigador en las que se desarrollen y se estudien desde el punto de vista científico-técnico experiencias piloto que contribuyan a avanzar al conocimiento y la caracterización del comportamiento de la agrivoltaica en nuestro país. Por lo que respecta a los cultivos a ensayar en estas plantas agrivoltaicas piloto como más adecuados en nuestro país, conviene señalar que los resultados de los estudios que se encuentran en la literatura científica y que han sido desarrollados fuera de nuestro territorio no se pueden generalizar universalmente ya que el comportamiento de un cultivo depende en gran medida de las condiciones climatológicas y geográficas. No obstante, a la luz de los resultados, se puede predecir un buen comportamiento agrivoltaico de algunos cultivos importantes para nuestro sector agrícola como la vid, el olivar, cítricos y frutales, el maíz, el trigo y la patata.

Por lo que respecta al diseño, como principios generales, estas instalaciones agrivoltaicas piloto deben:

- Basarse en el establecimiento de la agrivoltaica con criterios de mantenimiento y respeto a la agricultura y al paisaje propio de cada territorio, integrando, cuando fuera posible, la tecnología agrivoltaica en cultivos tradicionales preexistentes.
- Contemplar la monitorización y automatización de los procesos agrícolas y de producción eléctrica para facilitar el estudio de la tecnología.

A modo de avance se propondrían cinco tipos de instalaciones, compatibles, en principio, con cualquier cultivo, no existiendo una relación unívoca entre tecnología y cultivo:

I. Agrivoltaica interespacial en cultivos arbóreos (frutales, cítricos, olivar) con marco de plantación en retícula regular, con colectores fotovoltaicos fijos en alineaciones Este-Oeste e inclinación fija y orientación de captadores hacia el Sur (Figura 46).

Esta tipología, de bajo impacto paisajístico, permitirá una mejora en la disponibilidad del agua pluvial en suelo, así como un efecto cortaviento de los colectores solares. Simultáneamente, la presencia de los cultivos influye en la reducción de la temperatura media de los colectores, aumentando, por tanto, su rendimiento.

A título orientativo, una sustitución del 10% de árboles por colectores, supondría la posibilidad de instalar 150 kW/ha de colectores, que producirían anualmente 240.000 kWh/ha·año. Bajo la hipótesis de un precio de venta de 0.06 €/kWh, acorde con la situación de mercado en el momento de elaboración del presente informe (marzo, 2023), implicaría un ingreso de 14.400 €/ha·año. La instalación supondría un coste comprendido entre 90.000 y 100.000 €/ha.

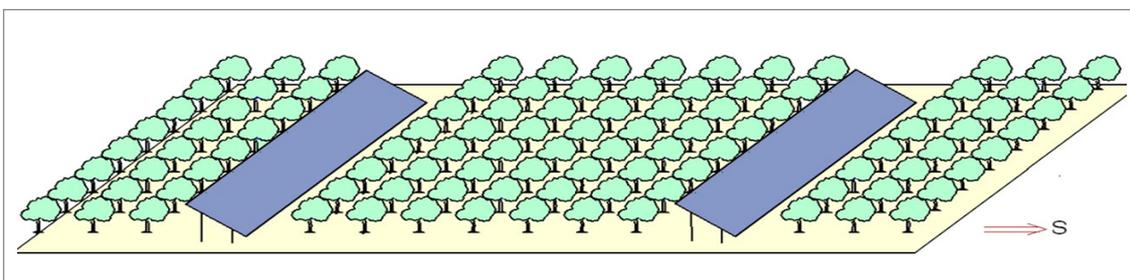


Figura 46. Instalación agrivoltaica propuesta para plantaciones arbóreas

II. Agrivoltaica interespacial en cultivos en seto orientados en dirección N-S, con colectores fotovoltaicos sobre seguidores solares de un eje también N-S que sustituyen a un determinado número de filas o setos de cultivo (Figura 47). En este modelo se propone que la altura del eje de los seguidores solares sea similar a la de los setos para reducir el sombreado del cultivo sobre los paneles fotovoltaicos.

En esta tipología el impacto paisajístico es también reducido y, al igual que la configuración anterior, permitirá una mejora en la disponibilidad del agua pluvial en suelo, así como un efecto cortaviento de los colectores solares. En función de la elevación y ancho de colectores también podrán ejercer un importante efecto de control de la reducción de radiación en épocas de calor, aliviando problemas de quemaduras o maduración prematura de frutos. Igualmente, una sustitución del 10% de los setos daría lugar a la posibilidad de instalar 150 kW/ha de potencia en módulos. La producción ascendería a 290.000 kWh/ha·año, con un ingreso anual de 17.400 €/ha·año y el coste de la instalación a 110.000 €/ha.

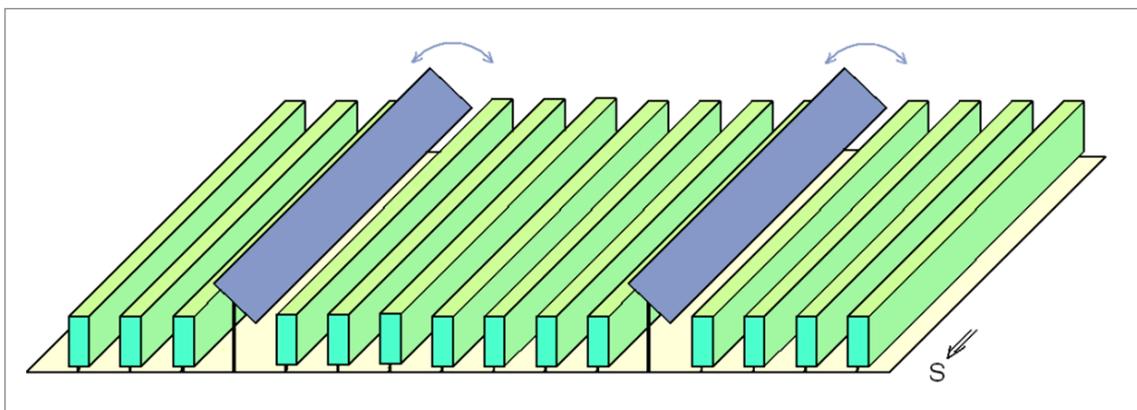


Figura 47. Instalación agrivoltaica propuesta para plantaciones en setos orientados N-S

III. Agrivoltaica interespacial en cultivos extensivos con colectores fijos sobre suelo.

Se distinguen dos posibles casos: a) en alineaciones Este-Oeste inclinación fija y orientación hacia el Sur (Figura 48), y b) colectores bifaciales verticales en dirección N-S (Figura 49).

En el primer caso (a) la instalación sería idéntica a la presentada en el primer prototipo propuesto (Agrivoltaica en cultivos arbóreos, Figura 46), por lo que esta instalación tendría también las sinergias descritas anteriormente.

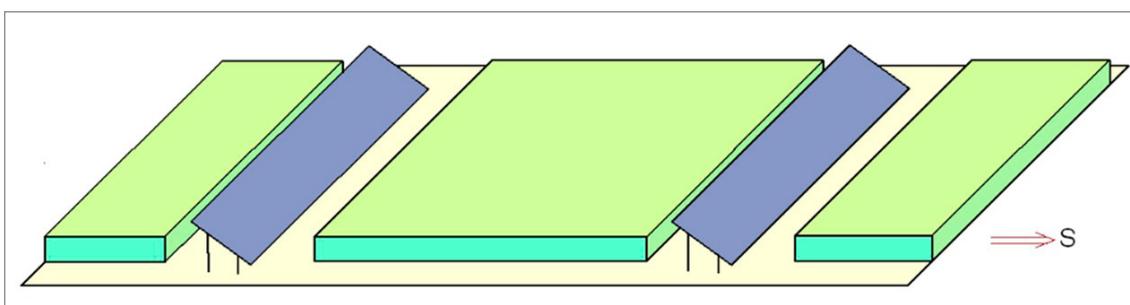


Figura 48. Instalación agrivoltaica para cultivos extensivos entre colectores inclinados al Sur

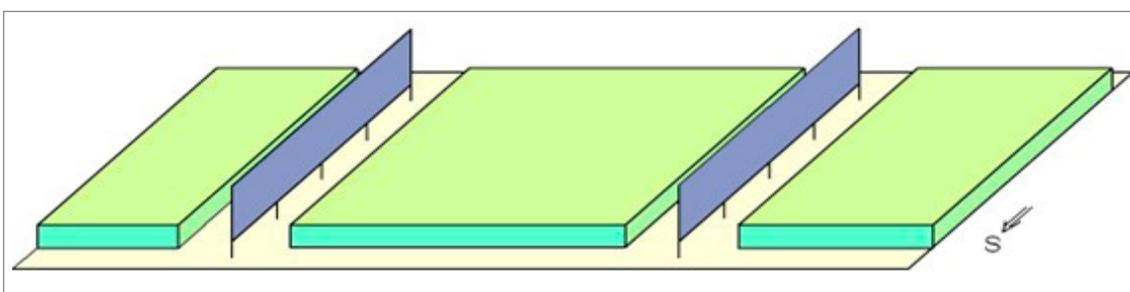


Figura 49. Instalación agrivoltaica para cultivos extensivos entre colectores verticales en alineación N-S

En el segundo caso (b), la instalación fotovoltaica ocupa muy poca superficie de cultivo, prácticamente la correspondiente a las bandas sin cultivar que se dejan por seguridad ante colisión de la maquinaria. Por tanto, estas plantas admitirían una capacidad fotovoltaica instalada de hasta 200 kW/ha, lo que produciría al año 240.000 kWh/ha

con un ingreso de 14.400 €/ha·año. En este caso, el coste de la instalación se elevaría a 150.000 €/ha.

IV. Agrivoltaica elevada sobre campo de cultivo: En esta configuración los colectores solares se dispondrían sobre estructuras elevadas por encima de cultivo (Figura 50).

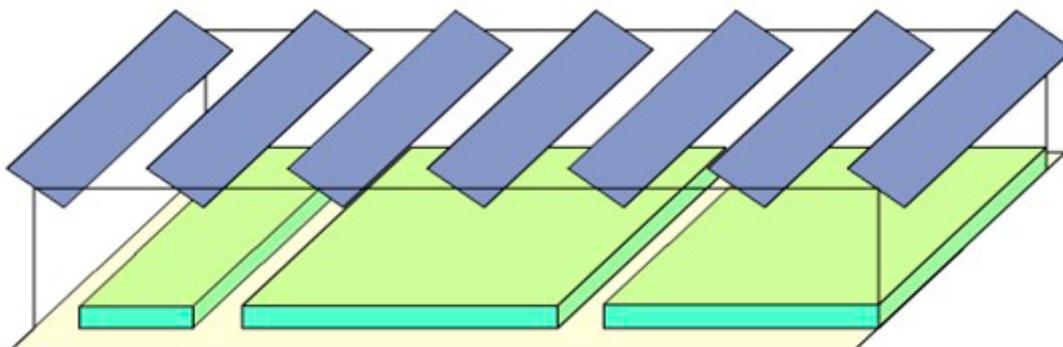


Figura 50. Propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cultivo

Como puede observarse en la Figura 50, en esta configuración no existe apenas ocupación de la superficie agrícola. De esta manera, la limitación de la superficie fotovoltaica procede de la necesidad de no mermar la productividad agrícola. Es la solución, por tanto, que admite mayor potencia por ha, dependiendo este valor de la tolerancia del cultivo al sombreado. Así, si se tratase de una planta de 500 kW/ha, podríamos establecer una producción energética de 9GWh/ha año lo que implicaría un ingreso de 54.000 €/ha·año.

Sin embargo, esta tipología requeriría una inversión de 800.000 €/ha. Para este cálculo se ha tenido en cuenta que esta tipología requiere la utilización de estructuras distintas a las que habitualmente se emplean en las instalaciones fotovoltaicas y específicas para este tipo de instalaciones agrivoltaicas. Para valorar con suficiente rigor el coste de este tipo de estructuras se ha realizado un diseño y cálculo mediante el software CYPECAD 3D. Concretamente, se han tomado perfiles tubulares en acero galvanizado. La hipótesis considerada dispone de una altura libre de 5,2 m y una inclinación de 15° (Figura 51) La estructura considerada tiene unas dimensiones en planta de 26x13 m y admite 120 módulos de 2x1 m. Asimismo se ha calculado una cimentación de tipo profundo.

Debido a este mayor coste, es necesario evaluar adecuadamente la rentabilidad de esta tipología cuya viabilidad, en muchos casos, podría depender de la concesión de ayudas al agricultor por parte de la Administración.



Figura 51. Estructura calculada para propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cultivo

Por último, es importante tener en cuenta que esta tipología podría presentar problemas de rechazo social similares a los de las plantas instalaciones fotovoltaicas convencionales. Como solución ante este efecto, la empresa BayWa r.e. ha cercado con cupresáceas sus instalaciones de esta índole en Países Bajos. Se recomendaría, por tanto, su implantación en terrenos horizontales, sin vistas que se cercarían perimetralmente con cipreses.

- V. **Agrivoltaica en invernaderos:** Se trataría de módulos en cubierta, o interiores con seguimiento (Figura 52). En principio, con cobertura del orden del 10%. Paisajísticamente, las zonas de invernadero ya se consideran degradadas, por lo que no cabría la adopción de medidas correctivas. Una cobertura del 10% en invernaderos de 2000 m² daría lugar a instalaciones de 30 kW/invernadero lo que implicaría una producción eléctrica de 45.000 kWh/invernadero·año y unos ingresos de 2.700 €/invernadero·año.

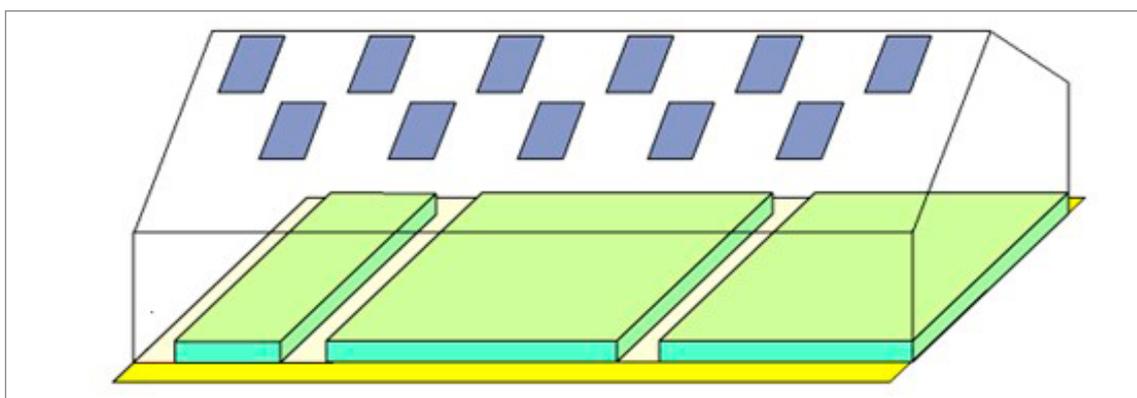


Figura 52. Propuesta de instalación agrivoltaica elevada sobre cubierta de invernadero

Recomendación 3: Establecer líneas de apoyo a la implantación de Plantas Agrivoltaicas. Estas líneas pueden estructurarse paralelamente a las limitaciones detectadas y descritas en el presente documento, en cuanto al sobrecoste de las plantas agrivoltaicas respecto de las plantas fotovoltaicas:

- Ayudas directas a proyectos agrivoltaicos viables que aminoren el sobre coste de instalaciones.
- Subastas de potencia específicas para plantas agrivoltaicas. Si bien en la actualidad (marzo 2023) esta oferta no es posible porque la mayor parte de subestaciones de evacuación están saturadas, la entrada en funcionamiento de las medidas previstas en el Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021-2026 permitirá que las subestaciones cuenten con nueva capacidad de evacuación para subastar. Será en este escenario cuando en cada subasta se pueda/deba realizar una reserva de potencia exclusiva para plantas Agrivoltaicas, siguiendo el modelo de Francia.
- Establecimiento de tarifas de remuneración de la electricidad vertida a red mediante tarifas especiales y diferenciadas (Feed in Tarif (FIT)), siguiendo el modelo de Alemania.

En todo caso, la Administración debe articular los mecanismos de seguimiento de las explotaciones agrivoltaicas reconocidas.

Recomendación 4: Armonizar la agrivoltaica como actividad diferenciada con Legislación propia. En este sentido se debe:

- Establecer el marco normativo adecuado que permita compatibilizar el uso agrivoltaico con la percepción de las ayudas establecidas por la PAC.
- Evaluar la posibilidad de compatibilizar la implantación agrivoltaica en zonas protegidas, de interés general, etc.
- Establecer normativa medioambiental específica para explotaciones agrivoltaicas ya que actualmente se aplicaría la normativa para centrales fotovoltaicas, quedando múltiples variables indefinidas.
- Adecuación de normativa para que explotaciones con cultivos con derechos de plantación regulados (v.g.: vid) no pierdan sus derechos en terrenos de uso dual agrivoltaico.

Recomendación 5: Afrontar las incertidumbres sobre los cultivos/variedades y técnicas de cultivo. Para ello se deberá establecer líneas de investigación agraria de adaptación de cultivos/variedades a condiciones de sombra y aporte hídrico, prestando especial atención a la divulgación de resultados.

Recomendación 6: Mejorar la Aceptación social de la solución Agrivoltaica. En este contexto se propone:

- Impulsar líneas de ayuda a modelos de explotación participativos (agricultor-operador fotovoltaico) en los que los agentes estén representados.
- Articular mecanismos para que los modelos de explotación queden abiertos a diferentes figuras del asociacionismo agrario (cooperativas, comunidades de regantes).
- Establecer requisitos de obligado cumplimiento a nuevos macro parques solares enfocados a la implantación obligada de plantas agrivoltaicas (diseño de plantas compatibles con la actividad agrivoltaica y modelos de explotación agrícola).

REFERENCIAS

1. Dietz, T.; Shwom, R.L.; Whitley, C.T. Climate Change and Society. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919-054614> 2020, 46, 135–158, doi:10.1146/Annurev-Soc-121919-054614.
2. IPCC Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge, 2022;
3. United Nations The European Green Deal. Communication from the Commission; Brussels, 2019;
4. European Council Fit for 55 Available online: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (accessed on Nov 21, 2022).
5. Rivera, L. Necesidad de una transición energética justa con las personas y la naturaleza; 2022;
6. REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe Available online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en (accessed on Mar 30, 2023).
7. Conclusiones Consejo Europeo diciembre 2020 Available online: <https://www.consilium.europa.eu/media/47348/1011-12-20-euco-conclusions-es.pdf> (accessed on Mar 30, 2023).
8. EurObserv'ER consortium Photovoltaic Barometer; 2022;
9. Masson, G.; Kaizuka, I. Trends in Photovoltaic Applications 2022; 2022;
10. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética; España, 2021; pp. 62009–62052;
11. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030; 2021;
12. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España RD 960/2020; Boletín Oficial del Estado: España, 2020;
13. Gómez-Uceda, F.J.; Varo-Martínez, M.; Ramírez-Faz, J.C.; López-Luque, R.; Fernández-Ahumada, L.M. Benchmarking Analysis of the Panorama of Grid-Connected PV Installations in Spain. *Technologies* 2022, 10, 131, doi:10.3390/technologies10060131.
14. Kavlak, G.; McNerney, J.; Trancik, J.E. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy Policy* 2018, 123, 700–710, doi:10.1016/j.enpol.2018.08.015.

15. Victoria, M.; Haegel, N.; Peters, I.M.; Sinton, R.; Jäger-Waldau, A.; del Cañizo, C.; Breyer, C.; Stocks, M.; Blakers, A.; Kaizuka, I.; et al. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule* 2021, 5, 1041–1056, doi:10.1016/J.JOULE.2021.03.005.
16. UNEF (Unión Española Fotovoltaica) Energía solar: apuesta segura para la recuperación económica. Informe anual UNEF 2022; Madrid, Spain, 2022;
17. Red Eléctrica Española REData - Potencia instalada Available online: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/potencia-instalada> (accessed on Mar 14, 2023).
18. Red Eléctrica Española ENERGÍA DEL SOL Potencia instalada, solar fotovoltaica Available online: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables/sol/potencia-instalada/solar-fotovoltaica-solpotencia> (accessed on Mar 14, 2023).
19. España instaló entre 2,4 y 2,5 GW fotovoltaicos para autoconsumo en 2022 – pv magazine España Available online: <https://www.pv-magazine.es/2023/01/23/espana-instalo-entre-24-y-2507-gw-fotovoltaicos-para-autoconsumo-en-2022/> (accessed on Mar 31, 2023).
20. UNEF Pv-Magazine. 2022,.
21. Instituto Nacional de Estadística, I. Distribución general de la superficie agrícola utilizada. Available online: <https://www.ine.es/jaxi/Datos.htm?tpx=52071>.
22. Red Eléctrica Española, R. Estructura de la Generación por Tecnologías Available online: <https://www.ree.es/es/datos/generacion/estructura-generacion>.
23. Estadísticas agrarias Available online: <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/> (accessed on Mar 31, 2023).
24. Andrés Escudero Población (Subdirección General de Análisis, C. y E.; Estadística, S.M.L. (Área de; Agroalimentaria), J.J.L.P. (Servicio de E.A. Anuario de estadística 2021; Madrid, Spain, 2021;
25. Subsecretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación Subdirección General de Análisis, C.Y.E. Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos; Madrid, Spain, 2022;
26. Unidad de Estadística Subdirección General de Análisis, Coordinación Y Estadística Subsecretaría Ministerio de Agricultura, P.Y.A. Índices y Precios Percibidos Agrarios; Madrid, Spain, 2023;
27. Sunsystemsgroup Alquiler de terrenos para huertos solares - Sun Systems Group Available online: <https://sunsystems.es/service/alquiler-huertos-solares/> (accessed on Mar 14, 2023).
28. TERRENOS.ES Alquiler de terreno para energías renovables, un fenómeno en auge Available online: <https://terrenos.es/blog/alquiler-de-terreno-energias-renovables#precio-medio-del-alquiler-de-terrenos-para-instalaciones-de-energ-iacute-as-renovables> (accessed on Mar 14, 2023).

29. Alquilerterreno.es ¿Está listo para maximizar los ingresos procedentes de sus tierras? Available online: <https://www.alquilerterreno.es/> (accessed on Mar 14, 2023).
30. Miravalles, C. Agronews Castilla y León. 2023,.
31. ABC Los propietarios de suelo rústico de Méntrida piden a la administración que reconsidere los proyectos solares. ABC 2023.
32. International Energy Agency -IEA Special Report on Solar PV Global Supply Chains; 2022;
33. Evans, M.E.; Adam Langley, J.; Shapiro, F.R.; Jones, G.F. A Validated Model, Scalability, and Plant Growth Results for an Agrivoltaic Greenhouse. *Sustain.* 2022, 14, doi:10.3390/su14106154.
34. Nonhebel, S. Renewable energy and food supply: will there be enough land? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2005, 9, 191–201, doi:10.1016/J.RSER.2004.02.003.
35. Sociedad Española de Agricultura Ecológica y Agroecología - SEAE Renovables Sí, pero NO así - SEAE Available online: <https://agroecologia.net/renovables-si-pero-no-asi-aliente/> (accessed on Mar 14, 2023).
36. Verdes Equo Andalucía ¡Renovables sí, pero no así! Available online: <https://equoandalucia.org/andalucia/renovables-si-pero-no-asi/> (accessed on Mar 14, 2023).
37. La Opinión - El correo de Zamora Nace "Zamora Viva", una asociación "en defensa del territorio" y contra las "macroplantas" de renovables - La Opinión de Zamora. La Opinión - El correo Zamora 2022.
38. Hernández, F. Atrapados por las renovables 2022.
39. Cuadernos Manchegos. 2023,.
40. 1.200 firmas de apoyo a las alegaciones contra las macroplantas fotovoltaicas de Viridi en Méntrida. ABC 2022.
41. ¡¡¡ Paremos los artículos 22 y 23 de Real Decreto Ley 20/2022 !!! Available online: <https://suelosolar.com/noticias/macro-instalaciones/espana/19-1-2023/-paremos-articulos-22-23-rdl-20-> (accessed on Mar 14, 2023).
42. EIA El gobierno exime de la evaluación de impacto ambiental a los proyectos de energías renovables, independientemente de su tamaño Available online: <https://www.eia.es/nota-de-prensa-rdl-20-2022/> (accessed on Mar 14, 2023).
43. Trommsdorff, M.; Dhal, I.S.; Özdemir, Ö.E.; Ketzer, D.; Weinberger, N.; Rösch, C. Agrivoltaics: Solar power generation and food production; 2022; ISBN 9780323898669.
44. Othman, N.F.; Ya'acob, M.E.; Abdul-Rahim, A.S.; Shahwahid Othman, M.; Radzi, M.A.M.; Hizam, H.; Wang, Y.D.; Ya'Acob, A.M.; Jaafar, H.Z.E. Embracing new agriculture commodity

- through integration of Java Tea as high Value Herbal crops in solar PV farms. *J. Clean. Prod.* 2015, 91, 71–77, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2014.12.044.
45. Malu, P.R.; Sharma, U.S.; Pearce, J.M. Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 2017, 23, 104–110, doi:10.1016/J.SETA.2017.08.004.
 46. Kim, B.; Kim, C.; Han, S.; Bae, J.; Jung, J. Is it a good time to develop commercial photovoltaic systems on farmland? An American-style option with crop price risk. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2020, 125, 109827, doi:10.1016/j.rser.2020.109827.
 47. Goetzberger, A.; Zastrow, A. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *Int. J. Sol. Energy* 1982, 1, 55–69, doi:10.1080/01425918208909875.
 48. Nagashima, A. *Solar Sharing—changing the world and life*; Access International Ltd: Tokyo, 2015;
 49. Schindele, S.; Trommsdorff, M.; Schlaak, A.; Oberfell, T.; Bopp, G.; Reise, C.; Braun, C.; Weselek, A.; Bauerle, A.; Högy, P.; et al. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Appl. Energy* 2020, 265, 114737, doi:10.1016/J.apenergy.2020.114737.
 50. Dupraz, C.; Marrou, H.; Talbot, G.; Dufour, L.; Nogier, A.; Ferard, Y. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renew. Energy* 2011, 36, 2725–2732, doi:10.1016/j.renene.2011.03.005.
 51. Elborg, M. Reducing Land Competition for Agriculture and Photovoltaic Energy Generation – A Comparison of Two Agro-Photovoltaic Plants in Japan. *I* 2018, 6, 2319–7064, doi:10.21275/1081704.
 52. Xue, J. Photovoltaic agriculture - New opportunity for photovoltaic applications in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 73, 1–9.
 53. Brohm, R., & Khanh, N.Q. *Dual-use approaches for solar energy and food production. International experience and potentials for Vietnam*; Hanoi, Vietnam., 2018;
 54. Amaducci, S.; Yin, X.; Colauzzi, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Appl. Energy* 2018, 220, 545–561, doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.081.
 55. Elamri, Y.; Cheviron, B.; Mange, A.; Dejean, C.; Liron, F.; Belaud, G. Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2017, 1–37, doi:10.5194/hess-2017-418.
 56. Agostini, A.; Colauzzi, M.; Amaducci, S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Appl. Energy* 2021, 281.
 57. Cuppari, R.I.; Higgins, C.W.; Characklis, G.W. Agrivoltaics and weather risk: A diversification strategy for landowners. *Appl. Energy* 2021, 291, 116809, doi:10.1016/J.apenergy.2021.116809.

58. Ott, E.M.; Kabus, C.A.; Baxter, B.D.; Hannon, B.; Celik, I. Environmental Analysis of Agrivoltaic Systems. *Compr. Renew. Energy* 2022, 127–139, doi:10.1016/B978-0-12-819727-1.00012-1.
59. Pulido-Mancebo, J.S.; López-Luque, R.; Fernández-Ahumada, L.M.; Ramírez-Faz, J.C.; Gómez-Uceda, F.J.; Varo-Martínez, M. Spatial Distribution Model of Solar Radiation for Agrivoltaic Land Use in Fixed PV Plants. *Agronomy* 2022, 12, 2799, doi:10.3390/agronomy12112799.
60. Kumpanalaisatit, M.; Setthapun, W.; Sintuya, H.; Pattiya, A.; Jansri, S.N. Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society. *Sustain. Prod. Consum.* 2022, 33, 952–963, doi:10.1016/j.spc.2022.08.013.
61. Kumpanalaisatit, M.; Jankasorn, A.; Setthapun, W.; Sintuya, H.; Jansri, S. The effect of space utilization under the ground-mounted solar farm on power generation. *Ajarcde (Asian J. Appl. Res. Community Dev. Empower.* 2019, 3, 14–16, doi:10.29165/AJARCDE.V3I1.15.
62. Kumpanalaisatit, M.; Setthapun, W.; Sintuya, H.; Jansri, S.N. Efficiency Improvement of Ground-Mounted Solar Power Generation in Agrivoltaic System by Cultivation of Bok Choy (*Brassica rapa subsp. chinensis L.*) Under the Panels. *Int. J. Renew. Energy Dev.* 2021, 11, 103–110, doi:10.14710/ijred.2022.41116.
63. Gupta, R.; Tiwari, G.N.; Kumar, A.; Gupta, Y. Calculation of total solar fraction for different orientation of greenhouse using 3D-shadow analysis in Auto-CAD. *Energy Build.* 2012, 47, 27–34, doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.010.
64. Santra, P.; Pande, P.C.; Kumar, S.; Mishra, D.; Singh, R.K. Agri-voltaics or solar farming: The concept of integrating solar PV based electricity generation and crop production in a single land use system. *Int. J. Renew. Energy Res.* 2017, 7, 694–699, doi:10.20508/ijrer.v7i2.5582.g7049.
65. Marrou, H.; Guilioni, L.; Dufour, L.; Dupraz, C.; Wery, J. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agric. For. Meteorol.* 2013, 177, 117–132, doi:10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
66. Fraunhofer Ise Institute Agrivoltaics: Press & Media Available online: <https://agri-pv.org/en/press-media/media/> (accessed on Mar 12, 2023).
67. Tajima, M.; Iida, T. Evolution of agrivoltaic farms in Japan. *AIP Conf. Proc.* 2021, 2361, doi:10.1063/5.0054674.
68. Abeysinghe, S.K.; Greer, D.H.; Rogiers, S.Y. The effect of light intensity and temperature on berry growth and sugar accumulation in *Vitis vinifera* "Shiraz" under vineyard conditions. *Vitis* 2019, 58, 7–16, doi:10.5073/vitis.2019.58.7-16.
69. Fraunhofer Institute Agrivoltaics: Opportunities for Agri-culture and the Energy Transition. 2022.

70. Weselek, A.; Ehmann, A.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Schindele, S.; Högy, P. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2019, 39, doi:10.1007/S13593-019-0581-3/Figures/1.
71. Majumdar, D.; Pasqualetti, M.J. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Landsc. Urban Plan.* 2018, 170, 150–168, doi:10.1016/j.landurbplan.2017.10.011.
72. Valle, B.; Simonneau, T.; Sourd, F.; Pechier, P.; Hamard, P.; Frisson, T.; Ryckewaert, M.; Christophe, A. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Appl. Energy* 2017, 206, 1495–1507, doi:10.1016/j.apenergy.2017.09.113.
73. Dinesh, H.; Pearce, J.M. The potential of agrivoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 54, 299–308.
74. Casares de la Torre, F.J.; Varo, M.; López-Luque, R.; Ramírez-Faz, J.; Fernández-Ahumada, L.M. Design and analysis of a tracking / backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants. *Renew. Energy* 2022, 187, 537–550, doi:10.1016/J.Renene.2022.01.081.
75. Cossu, M.; Murgia, L.; Ledda, L.; Deligios, P.A.; Sirigu, A.; Chessa, F.; Pazzona, A. Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Appl. Energy* 2014, 133, 89–100, doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.070.
76. Fatnassi, H.; Poncet, C.; Bazzano, M.M.; Brun, R.; Bertin, N. A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. *Sol. Energy* 2015, 120, 575–584, doi:10.1016/j.solener.2015.07.019.
77. López-Díaz, G.; Carreño-Ortega, A.; Fatnassi, H.; Poncet, C.; Díaz-Pérez, M. The Effect of Different Levels of Shading in a Photovoltaic Greenhouse with a North–South Orientation. *Appl. Sci.* 2020, Vol. 10, Page 882 2020, 10, 882, doi:10.3390/APP10030882.
78. La agricultura y el cambio climático – Agencia Europea de Medio Ambiente Available online: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2015/articulos/la-agricultura-y-el-cambio-climatico> (accessed on Mar 30, 2023).
79. Marrou, H.; Wery, J.; Dufour, L.; Dupraz, C. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Eur. J. Agron.* 2013, 44, 54–66, doi:10.1016/J.Eja.2012.08.003.
80. Homma, M.; Doi, T.; Yoshida, Y. A field experiment and the simulation on agrivoltaic-systems regarding to rice in a paddy field. *J. Japan Soc. Energy Resour.* 2016, 37, 23–31.
81. Barron-Gafford, G.A.; Pavao-Zuckerman, M.A.; Minor, R.L.; Sutter, L.F.; Barnett-Moreno, I.; Blackett, D.T.; Thompson, M.; Dimond, K.; Gerlak, A.K.; Nabhan, G.P.; et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat. Sustain.* 2019 29 2019, 2, 848–855, doi:10.1038/s41893-019-0364-5.

82. Irie, N.; Kawahara, N.; Esteves, A.M. Sector-wide social impact scoping of agrivoltaic systems: A case study in Japan. *Renew. Energy* 2019, 139, 1463–1476, doi:10.1016/j.renene.2019.02.048.
83. Trommsdorff, M.; Kang, J.; Reise, C.; Schindele, S.; Bopp, G.; Ehmann, A.; Weselek, A.; Högy, P.; Obergfell, T. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 140, doi:10.1016/j.rser.2020.110694.
84. Campana, P.E.; Stridh, B.; Amaducci, S.; Colauzzi, M. Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *J. Clean. Prod.* 2021, 325, 129091, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2021.129091.
85. Massachusetts Department of Energy Resources DUAL-USE SHADING ANALYSIS TOOL Available online: <http://s3.us-east-2.amazonaws.com/bluewave-shade/jan23-1002/index.html> (accessed on Feb 20, 2023).
86. Beck, M.; Bopp, G.; Goetzberger, A.; Obergfell, T.; Reise, C.; Schindele, S. Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic – Optimization of Orientation and Harvest. 27th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. 2012, 4096–4100, doi:10.4229/27THEUPVSEC2012-5AV.2.25.
87. Berkeley Lab Radiance: Synthetic Imaging Software.
88. Faust, J.E.; Logan, J. Daily Light Integral: A Research Review and High-resolution Maps of the United States. *HortScience* 2018, 53, 1250–1257, doi:10.21273/HORTSCI13144-18.
89. Oliphant, A.J.; Stoy, P.C. An Evaluation of Semiempirical Models for Partitioning Photosynthetically Active Radiation Into Diffuse and Direct Beam Components. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 2018, 123, 889–901, doi:10.1002/2017JG004370.
90. Serrano-Arellano, J.; Gijón-Rivera, M.; Chávez-Servín, J.L.; de la Torre-Carbot, K.; Xamán, J.; Álvarez, G.; Belman-Flores, J.M. Numerical study of thermal environment of a greenhouse dedicated to amaranth seed cultivation. *Sol. Energy* 2015, 120, 536–548, doi:10.1016/J.Solener.2015.08.004.
91. Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu, F.; Noda, S. Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north–south oriented greenhouse. *Biosyst. Eng.* 2009, 103, 228–238, doi:10.1016/J.Biosystemseng.2009.02.020.
92. Castellano, S.; Santamaria, P.; Serio, F. Solar radiation distribution inside a monospan greenhouse with the roof entirely covered by photovoltaic panels. *J. Agric. Eng.* 2016, 47, 1–6, doi:10.4081/jae.2016.485.
93. Bojacá, C.R.; Gil, R.; Cooman, A. Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations. *Comput. Electron. Agric.* 2009, 65, 219–227, doi:10.1016/J.Compag.2008.10.001.

94. Carlini, M.; Honorati, T.; Castellucci, S. Photovoltaic greenhouses: Comparison of optical and thermal behaviour for energy savings. *Math. Probl. Eng.* 2012, 2012, doi:10.1155/2012/743764.
95. Attar, I.; Farhat, A. Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate. *Sol. Energy* 2015, 119, 212–224, doi:10.1016/J.Solener.2015.06.040.
96. Bambara, J.; Athienitis, A. Experimental Evaluation and Energy Modeling of a Greenhouse Concept with Semi-transparent Photovoltaics. *Energy Procedia* 2015, 78, 435–440, doi:10.1016/J.Egypro.2015.11.689.
97. Armstrong, A.; Ostle, N.J.; Whitaker, J. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environ. Res. Lett.* 2016, 11, 074016, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074016.
98. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - . *FAO Irrig. Drain. Pap.* 56 2006, 48.
99. Marrou, H.; Dufour, L.; Wery, J. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *Eur. J. Agron.* 2013, 50, 38–51, doi:10.1016/j.eja.2013.05.004.
100. Feistel, U. Wie PV-Freiflächenanlagen den Bodenwasserhaushalt verändern – Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands ; 2020;
101. Elamri, Y.; Cheviron, B.; Lopez, J.M.; Dejean, C.; Belaud, G. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agric. Water Manag.* 2018, 208, 440–453, doi:10.1016/j.agwat.2018.07.001.
102. E Hassanpour Adeh, J.S.C.H. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS One* 2018, 13, e0203256, doi:10.1371/journal.pone.0203256.
103. Stuart Chapin, F.; Matson, P.A.; Vitousek, P.M. Principles of terrestrial ecosystem ecology. *Princ. Terr. Ecosyst. Ecol.* 2012, 1–529, doi:10.1007/978-1-4419-9504-9/Cover.
104. Weselek, A.; Bauerle, A.; Hartung, J.; Zikeli, S.; Lewandowski, I.; Högy, P. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate., doi:10.1007/s13593-021-00714-y/Published.
105. Arenas-Corraliza, M.G.; Rolo, V.; López-Díaz, M.L.; Moreno, G. Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions., doi:10.1038/s41598-019-46027-9.
106. Feuerbacher, A.; Laub, M.; Högy, P.; Lippert, C.; Pataczek, L.; Schindele, S.; Wieck, C.; Zikeli, S. An analytical framework to estimate the economics and adoption potential of dual land-use systems: The case of agrivoltaics. *Agric. Syst.* 2021, 192.

107. Herbert, S. Vegetables under Solar PV 2016-17; Massachuset, EEUU, 2018;
108. Center for Agriculture Food and the Environment Dual-Use: Crop and Livestock Considerations; 2018;
109. Herbert, S. 2018 UMass Dual-Use Solar Agricultural Report and Final Report Summary; Massachuset, EEUU, 2018;
110. Sun'Agri Sun'Agri Project Available online: <https://sunagri.fr/> (accessed on Mar 22, 2023).
111. Duchêne, E.; Huard, F.; Dumas, V.; Schneider, C.; Merdinoglu, D. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Clim. Res.* 2010, 41, 193–204, doi:10.3354/CR00850.
112. Leeuwen, C. van; Darriet, P. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality*. *J. Wine Econ.* 2016, 11, 150–167, doi:10.1017/Jwe.2015.21.
113. Gambetta, J.M.; Holzapfel, B.P.; Stoll, M.; Friedel, M. Sunburn in Grapes: A Review. *Front. Plant Sci.* 2021, 11, 2123, doi:10.3389/FPLS.2020.604691/BIBTEX.
114. Mira de Orduña, R. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 2010, 43, 1844–1855, doi:10.1016/j.foodres.2010.05.001.
115. Jones, G. V.; Davis, R.E. Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *Am. J. Enol. Vitic.* 2000, 51, 249–261, doi:10.5344/AJEV.2000.51.3.249.
116. Paciello, P.; Mencarelli, F.; Palliotti, A.; Ceccantoni, B.; Thibon, C.; Darriet, P.; Pasquini, M.; Bellincontro, A. Nebulized water cooling of the canopy affects leaf temperature, berry composition and wine quality of Sauvignon blanc. *J. Sci. Food Agric.* 2017, 97, 1267–1275, doi:10.1002/JSFA.7860.
117. Lu, H.C.; Wei, W.; Wang, Y.; Duan, C.Q.; Chen, W.; Li, S. De; Wang, J. Effects of sunlight exclusion on leaf gas exchange, berry composition, and wine flavour profile of Cabernet-Sauvignon from the foot of the north side of Mount Tianshan and a semi-arid continental climate. *OENO One* 2021, 55, 267–283, doi:10.20870/OENO-ONE.2021.55.2.4545.
118. Tiffon-Terrade, B.; Simonneau, T.; Caffarra, A.; Boulord, R.; Pechier, P.; Saurin, N.; Romieu, C.; Fumey, D.; Christophe, A. Delayed grape ripening by intermittent shading to counter global warming depends on carry-over effects and water deficit conditions. *OENO One* 2023, 57, 71–90, doi:10.20870/OENO-ONE.2023.57.1.5521.
119. Cho, J.; Park, S.M.; Reum Park, A.; Lee, O.C.; Nam, G.; Ra, I.H. Application of photovoltaic systems for agriculture: A study on the relationship between power generation and farming for the improvement of photovoltaic applications in agriculture. *Energies* 2020, 13, 1–18, doi:10.3390/en13184815.
120. Benjamin Tiffon-Terrade Effect of Shading on Phenological Development of Grapevines. In *Proceedings of the Agrivoltaics2020*; 2020.

121. Teitel, M.; Friman-Peretza, M.; Ozer, S. Agrivoltaics in protected cultivation . Isr. Agric. Int. Portal 2021.
122. Regace Project - Using Co2 for Green Energy Available online: <https://regaceproject.com/> (accessed on Mar 30, 2023).
123. Ayala, P. AgroPV Mancomunidad energía solar y agricultura; 2016;
124. Tani, A.; Shiina, S.; Nakashima, K.; Hayashi, M. Improvement in lettuce growth by light diffusion under solar panels. *J. Agric. Meteorol.* 2014, 70, 139–149, doi:10.2480/agrmet.D-14-00005.
125. Artru, S.; Garré, S.; Dupraz, C.; Hiel, M.P.; Blitz-Frayret, C.; Lassois, L. Impact of spatio-temporal shade dynamics on wheat growth and yield, perspectives for temperate agroforestry. *Eur. J. Agron.* 2017, 82, 60–70, doi:10.1016/J.EJA.2016.10.004.
126. Sekiyama, T.; Nagashima, A. Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environ.* 2019, Vol. 6, Page 65 2019, 6, 65, doi:10.3390/EnvironmentS6060065.
127. Reed, A.J.; Singletary, G.W.; Schussler, J.R.; Williamson, D.R.; Christy, A.L. Shading Effects on Dry Matter and Nitrogen Partitioning, Kernel Number, and Yield of Maize. *Crop Sci.* 1988, 28, 819–825, doi:10.2135/CROPSCI1988.0011183X002800050020X.
128. Islam, M.S.; Morison, J.I.L. Influence of solar radiation and temperature on irrigated rice grain yield in Bangladesh. *F. Crop. Res.* 1992, 30, 13–28, doi:10.1016/0378-4290(92)90053-C.
129. Kurupparachchi, D.S.P. Intercropped potato (*Solanum* spp.): Effect of shade on growth and tuber yield in the northwestern regosol belt of Sri Lanka. *F. Crop. Res.* 1990, 25, 61–72, doi:10.1016/0378-4290(90)90072-J.
130. El-Gizawy, A.M.; Abdallah, M.M.F.; Gomaa, H.M.; Mohamed, S.S. Effect of Different Shading Levels on Tomato Plants. 2. Yield and Fruit Quality. *Acta Hortic.* 1993, 349–354, Doi:10.17660/Actahortic.1993.323.32.
131. Cantagallo, J.E.; Medan, D.; Hall, A.J. Grain number in sunflower as affected by shading during floret growth, anthesis and grain setting. *F. Crop. Res.* 2004, 85, 191–202, doi:10.1016/S0378-4290(03)00160-6.
132. Chen, B.L.; Yang, H.K.; Ma, Y.N.; Liu, J.R.; Lv, F.J.; Chen, J.; Meng, Y.L.; Wang, Y.H.; Zhou, Z.G. Effect of shading on yield, fiber quality and physiological characteristics of cotton subtending leaves on different fruiting positions., doi:10.1007/s11099-016-0209-7.
133. Laub, M.; Pataczek, L.; Feuerbacher, A.; Zikeli, S.; Högy, P. Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis., doi:10.1007/s13593-022-00783-7/Published.
134. Smart Climate Agri-Pv - Inderen Available online: <https://inderen.es/es/smart-climate-agri-pv-inteligencia-artificial-teledeteccion-drones-soluciones-agrovoltasicas/> (accessed on Mar 30, 2023).

135. L'excellence de l'agrivoltaïsme au service des cultures - Ombrea Available online: <https://www.ombrea.fr/> (accessed on Mar 30, 2023).
136. France's Ombrea develops solar blinds with sliding PV panels – pv magazine International Available online: <https://www.pv-magazine.com/2019/12/05/french-start-up-ombrea-develops-solar-blinds-made-of-sliding-pv-panels/> (accessed on Mar 30, 2023).
137. Gorjian, S.; Bousi, E.; Özdemir, Ö.E.; Trommsdorff, M.; Kumar, N.M.; Anand, A.; Kant, K.; Chopra, S.S. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, 158, 112126, doi:10.1016/J.rser.2022.112126.
138. Special solar panels for agrivoltaics – pv magazine International Available online: <https://www.pv-magazine.com/2020/07/23/special-solar-panels-for-agrivoltaics/> (accessed on Mar 30, 2023).
139. What is Sphelar® - Technology - Sphelar Power Corporation Available online: <https://www.sphelarpower.com/technology/> (accessed on Mar 30, 2023).
140. soliculture Lumo Greenhouse Improve Your Power, Produce & Profits Available online: <http://www.soliculture.com/>.
141. BISOL Lumina.
142. Schuppisser, D. Translucent High-Efficiency In Agrivoltaics (THEIA) 18. Nationale Photovoltaik Tagung | EPFL Lausanne.
143. Nardin, G.; Domínguez, C.; Aguilar, Á.F.; Anglade, L.; Duchemin, M.; Schuppisser, D.; Gerlich, F.; Ackermann, M.; Coulot, L.; Cuénod, B.; et al. Industrialization of hybrid Si/III–V and translucent planar micro-tracking modules. *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 2021, 29, 819–834, doi:10.1002/PIP.3387.
144. ASCA® | The photovoltaic solution that unlocks your imagination Available online: <https://www.asca.com/> (accessed on Mar 30, 2023).
145. Locally made Agri-PV product introduced | Environment | Vietnam+ (VietnamPlus) Available online: <https://en.vietnamplus.vn/locally-made-agripv-product-introduced/208285.vnp> (accessed on Mar 30, 2023).
146. The Future of Photovoltaics - TubeSolar AG Available online: <https://tubesolar.de/en/the-future-of-photovoltaics/> (accessed on Mar 30, 2023).
147. Zheng, J.; Meng, S.; Zhang, X.; Zhao, H.; Ning, X.; Chen, F.; Omer, A.A.A.; Ingenhoff, J.; Liu, W. Increasing the comprehensive economic benefits of farmland with Even-lighting Agrivoltaic Systems. *PLoS One* 2021, 16, e0254482, doi:10.1371/Journal.Pone.0254482.
148. Estructuras Agrivoltaicas Available online: <https://solasolenergy.com/agrovoltaica/>.

149. Sunfer Agrovoltaica Available online: <https://sunferenergy.com/agrovoltaica/>.
150. MetalFrame Renovables Available online: <https://www.mfrenovables.com/es/>.
151. SunSupport No Title.
152. Custom made steel profiles | voestalpine Sadef Available online: <https://www.voestalpine.com/sadef/en> (accessed on Mar 30, 2023).
153. Next2Sun Testimonials Agri-PV Plants Available online: <https://next2sun.com/en/testimonials/agripv-systems/> (accessed on Mar 25, 2023).
154. Khan, M.R.; Hanna, A.; Sun, X.; Alam, M.A. Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization. *Appl. Energy* 2017, 206, 240–248, doi:10.1016/j.apenergy.2017.08.042.
155. Vision - Spinnanker Available online: <http://www.spinnanker.com/en/?unternehmen> (accessed on Mar 30, 2023).
156. Concrete-free Foundations - WOLF System Available online: <https://www.wolfssystem.at/en-at/product-lines/industrial-and-commercial-construction/foundations/concrete-free-foundations> (accessed on Mar 30, 2023).
157. Coresystems. La cimentación ecológica Available online: <https://www.ecoresystems.es/>.
158. TRAMAT Cimentación Atronillada Available online: <https://tramat.net/cimentacion-atornillada/>.
159. Diseño, fabricación e instalación de seguidores y estructuras fijas Available online: <https://www.axialstructural.com/> (accessed on Mar 30, 2023).
160. Mechatron Solar – Unique, Patented Gearless Tracking Boosts Reliability Available online: <https://mechatron-solar.com/> (accessed on Mar 30, 2023).
161. Scharf, J.; Grieb, M.; Fritz, M. Agri-Photovoltaik Stand und offene Fragen; Straubing, Alemania, 2021;
162. Horowitz, K.; Ramasamy, V.; Macknick, J.; Margolis, R. Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops. 2020, doi:10.2172/1756713.
163. HRC Steel - Price - Chart - Historical Data - News Available online: <https://tradingeconomics.com/commodity/hrc-steel> (accessed on Jun 14, 2024).
164. Cappelle, J.; Herteleer, B.; Ronsijn, B.; Uytterhaegen, B.; Willockx, B. A Standardized Classification and Performance Indicators of Agrivoltaic Systems. 37th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib. 2020, 252, 1995–1998, doi:10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47.

165. Pascaris, A.S.; Schelly, C.; Burnham, L.; Pearce, J.M. Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. *Energy Res. Soc. Sci.* 2021, 75, 102023, doi:10.1016/J.ERSS.2021.102023.
166. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission Available online: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/ (accessed on Mar 30, 2023).
167. Home - System Advisor Model - SAM. Available online: <https://sam.nrel.gov/> (accessed on Mar 30, 2023).
168. Agrivoltaics. Market Research Study; Washington, USA, 2022;
169. Ketzer, D.; Schlyter, P.; Weinberger, N.; Rösch, C. Driving and restraining forces for the implementation of the Agrophotovoltaics system technology – A system dynamics analysis. *J. Environ. Manage.* 2020, 270, 110864, doi:10.1016/J.Jenvman.2020.110864.
170. Scognamiglio, A. 'Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 55, 629–661, doi:10.1016/J.RSER.2015.10.072.
171. Zoellner, J.; Schweizer-Ries, P.; Wemheuer, C. Public acceptance of renewable energies: Results from case studies in Germany. *Energy Policy* 2008, 36, 4136–4141, doi:10.1016/J.ENPOL.2008.06.026.
172. Beelmeon, J. Characterizing photovoltaic projects on agricultural land and agrivoltaism - Executive summary of the study Characterizing photovoltaic projects on agricultural land and agrivoltaism - Executive summary of the study; Paris, 2021;
173. Agrophotovoltaik: hohe Ernteerträge im Hitzesommer - Fraunhofer ISE Available online: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/agrophotovoltaik-hohe-ernteertraege-im-hitzesommer.html> (accessed on Mar 30, 2023).
174. Dos Santos, C.N.L. Agrivoltaic system : A possible synergy between agriculture and solar energy. 2020.
175. Jung, D.; Gareis, G.H.; Staiger, A.; Salmon, A. Effects of soiling on agrivoltaic systems: Results of a case study in Chile. *AIP Conf. Proc.* 2022, 2635, 020001, doi:10.1063/5.0107943.
176. Propuesta de Regulación Relativa a la Protección de los usos del suelo de las zonas regables declaradas de interés general Available online: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/plan-nacional-regadios/informaciones-publicas/pp_propuesta_regulacion_proteccion_usos_suelo_zr_ig.aspx (accessed on Mar 30, 2023).
177. Diario Oficial de la Unión Europea DIRECTIVA (UE) 2018/ 2001 Del Parlamento Europeo y del Consejo - de 11 de diciembre de 2018 - relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

178. Ministero della Transizione Ecologica - Dipartimento Per L'energia Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici; 2022;
179. Decreto-Legge 24 gennaio 2012, n. 1 (Raccolta 2012)(1) - Normattiva Available online: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legge:2012-01-24;1> (accessed on Mar 31, 2023).
180. Federal Court of Justice Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften Available online: https://www.bundesgerichtshof.de/DE/Bibliothek/GesMat/WP19/E/EEG_2021.html;jsessionid=426A04FF7C0DCA80DCCEA2A99ABAE1AF.internet952?nn=10731926 (accessed on Mar 31, 2023).
181. Diario Oficial Unión Europea Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Available online: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1992-81200> (accessed on Mar 31, 2023).
182. DIN SPEC 91434:2021-05. Agri-photovoltaic systems - Requirements for primary agricultural use.; 2021;
183. Agri-photovoltaic systems - Requirements for primary agricultural use Available online: <https://www.en-standard.eu/din-spec-91434-agri-photovoltaic-systems-requirements-for-primary-agricultural-use/> (accessed on Mar 31, 2023).
184. Ministère Écologie Énergie Territoires Programmes pluriannuelles de l'énergie (PPE) Available online: <https://www.ecologie.gouv.fr/programmes-pluriannuelles-lenergie-ppe> (accessed on Mar 31, 2023).
185. Légifrance LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte Available online: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385> (accessed on Mar 31, 2023).
186. Boletín Oficial del Estado Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Available online: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-17278> (accessed on Mar 31, 2023).
187. Boletín Oficial del Estado Circular 1/2021, de 20 de enero, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología y condiciones del acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica. Available online: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-904 (accessed on Mar 31, 2023).
188. Boletín Oficial del Estado Resolución de 20 de mayo de 2021, de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establecen las especificaciones de detalle para la determinación de la capacidad de acceso de generación a la red de transporte y a las redes de distribución. Available online: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-9231 (accessed on Mar 31, 2023).

189. Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2021-2026; Ministerio de para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021; pp. 1–534;.
190. Boletín Oficial del Estado Orden TEC/212/2019, de 25 de febrero, por la que se inicia el procedimiento para efectuar propuestas de desarrollo de la red de transporte de energía eléctrica con Horizonte 2026. Available online: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-2965 (accessed on Mar 31, 2023).
191. Endesa empieza a aplicar la agrivoltaica en cuatro plantas solares - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.
192. Endesa anuncia el desarrollo de un proyecto agrovoltaico con algarrobo en Baleares Available online: <https://www.pv-magazine.es/2022/10/21/endesa-anuncia-el-desarrollo-de-un-proyecto-agrovoltaico-con-algarrobo-en-baleares/> (accessed on Mar 30, 2023).
193. ¿En qué consiste la agrivoltaica? | Canal Extremadura Available online: <http://www.canalextramadura.es/video/en-que-consiste-la-agrivoltaica> (accessed on Mar 30, 2023).
194. Agrivoltaismo en la viña catalana - Vitivinícola Available online: <https://www.interempresas.net/Vitivinicola/Articulos/327884-Agrivoltaismo-en-la-vina-catalana.html> (accessed on Mar 30, 2023).
195. Vidvolt4.0 finaliza con la creación de una solución tecnológica para mejorar el rendimiento de la vid Available online: <https://www.innovi.cat/noticias/vidvolt40-finalitza-amb-la-creacio-duna-solucio-tecnologica-per-millorar-el-rendiment-del-cultiu-de-la-vinya/> (accessed on Mar 30, 2023).
196. Endesa y Carob trabajan juntos en proyectos agrovoltaicos en el camino de la descarbonización de las Islas Baleares Available online: <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/endesa-y-carob-trabajan-juntos-en-proyectos-20221104> (accessed on Mar 30, 2023).
197. Tomates bajo un sol 'renovable': Prensa Ibérica para Iberdrola Available online: <https://www.levante-emv.com/ideas/Huella-Positiva/Tomates.html> (accessed on Mar 30, 2023).