



Simulación del uso compartido del terreno agrícola por paneles solares fotovoltaicos y cultivo

H. X. Wang¹, M.A. Muñoz-García², G.P. Moreda Cantero², I. Molina López²

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China.

² Dpto. Ingeniería Agroforestal. LPF-TAGRALIA. ETSIAAB, UPM. Av. Puerta de Hierro, 2-4, 28040 Madrid, Spain; miguelangel.munoz@upm.es, guillermo.moreda@upm.es.

Resumen: Para mitigar una eventual competencia por el recurso suelo entre la producción agrícola y la producción eléctrica fotovoltaica (“huerto solar”), existe la posibilidad de combinar ambas actividades en un mismo terreno o parcela. En este trabajo se analiza la producción combinada agrícola-eléctrica de diferentes configuraciones de explotación *agrivoltaica*. Para el caso de coexistencia con trigo duro, se comparan diferentes separaciones entre hileras de paneles fotovoltaicos. Para el caso de paneles elevados 4 m sobre el suelo, en hileras distanciadas 6 m, valores que permiten una fácil mecanización del cultivo, la disminución del rendimiento de trigo es de solo el 6,1%, con la ventaja respecto a *solo cultivo* de la energía eléctrica obtenida. Comparando el uso independiente de una determinada superficie de terreno con el uso combinado o compartido, el uso compartido supone un aumento conjunto de la productividad del 22%.

Palabras clave: Agrivoltaico/a; Energía solar; LER; Producción eléctrica

1. Introducción

El concepto de sistema agrivoltaico fue introducido por Goetzberger y Zastrow [1], al estudiar el uso combinado de la tierra para la producción concomitante agrícola-eléctrica. Dupraz et al. [2] combinaron los términos agricultura y fotovoltaico en la contracción *agrivoltaico* (AV). La idea de sistema AV está relacionada en cierto modo con el sistema agroforestal de *intercultivo*. Este último se refiere a la asociación en una misma parcela de un cultivo anual de porte bajo que se desarrolla en las calles de una plantación forestal en líneas. En el caso del sistema AV, las hileras de árboles son sustituidas por hileras de paneles fotovoltaicos.

Marrou et al. [3] implantaron una explotación experimental AV en Montpellier (Francia), con lechuga como cultivo. Dicha instalación fue diseñada teniendo en cuenta las dimensiones habituales de la maquinaria para la mecanización de ese cultivo hortícola.

Un aspecto clave para cualquier sistema AV es determinar en qué grado se ven afectados el rendimiento e incluso la calidad del cultivo. Las explotaciones AV están empezando a recibir atención por parte de las administraciones públicas en algunos países. Por ejemplo, la mancomunidad de Massachusetts [4] establece incentivos para la producción agropecuaria y eléctrica combinada. En este caso, una de las opciones contempladas son los pastos para aprovechamiento directo in-situ del ganado.

El objetivo de este trabajo es comparar el uso independiente del terreno con el compartido o agrivoltaico, para diferentes configuraciones de sistema AV.

2. Materiales y Métodos

2.1. Configuración de la instalación agrivoltaica

El diseño del sistema agrivoltaico (AV) objeto de análisis se esquematiza en la Figura 1. Los paneles, rectangulares, son de azimut e inclinación fijos. Las hileras de paneles fotovoltaicos siguen una alineación Este-Oeste, de tal forma que la cara activa de los paneles queda orientada al Sur. Los paneles se colocan en posición apaisada, es decir con el lado más largo o base del rectángulo paralelo a la dirección Este-Oeste. Denominamos S a la distancia entre hileras de paneles; H a la altura mínima de los paneles (Figura 1); T al ángulo de inclinación de los paneles; y W a la anchura de los paneles medida en verdadera magnitud (dicha anchura corresponde al lado corto de los paneles o altura del rectángulo, por la disposición apaisada).

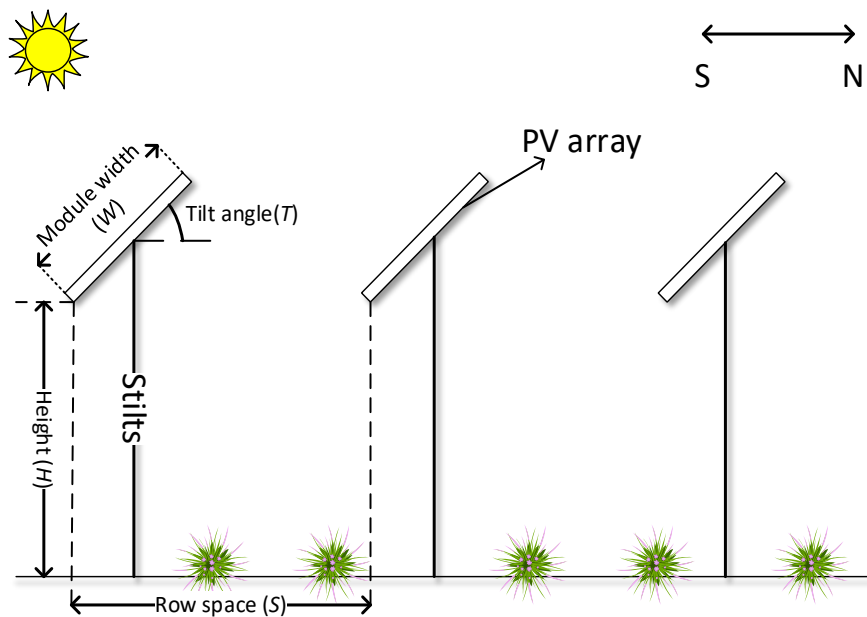


Figura 1. Configuración espacial de la instalación agrivoltaica. Los paneles fotovoltaicos se instalan elevados sobre postes (*stilts*).

Variando S y H se pueden comparar diferentes instalaciones. Cada instalación se identifica por un código alfanumérico, $SxHyTz$, en el que:

$$S = x \text{ (m)},$$

$$H = y \text{ (m)}, \text{ y}$$

$$T = 10 \cdot z \text{ (}^\circ\text{)}$$

Por ejemplo, en la Figura 2 se ha representado la instalación AV de tipo S6H4T3.

Conviene utilizar el índice conocido como grado o relación de cobertura del suelo, (*ground coverage ratio*, GCR), definido como:

$$\text{GCR} = W/S$$

En general, dependiendo del cultivo considerado y la maquinaria necesaria para la mecanización de las labores de cultivo, será preferible una geometría u otra de la instalación AV. En la Tabla 1 se han resumido algunos parámetros esenciales de tres instalaciones AV. Por ejemplo, el grado de cobertura del suelo (CGR) para la instalación S6H4T3 es del 17%.

Tabla 1. Configuración de tres posibles instalaciones agrivoltaicas.

Instalación	Nº paneles/fila	Nº de filas en paralelo	Potencia FV instalada (W)	Nº de inversores	Superficie del sistema FV (m ²)	Grado de cobertura del suelo, GCR (%)
S15H4T3	12	8	96×230	4	158,4	67
S3H4T3	12	4	48×230	2	79,2	33
S6H4T3	12	2	24×230	1	39,6	17

El panel fotovoltaico (FV) considerado para nuestro análisis es un módulo monofacial de silicio multicristalino, concretamente el ‘Suntech STP 230’, que mide 1,65 m × 1 m y desarrolla una potencia nominal de 230 Wp.

La localización considerada para el análisis es Madrid, concretamente una parcela de 240 m² (Figura 2) con una latitud de 40,4426 °N y una longitud de 3,7295 °O. Se ha tomado un ángulo de inclinación de los paneles de acuerdo con el criterio general de *la latitud menos 10°*, es decir, aproximadamente 30°.

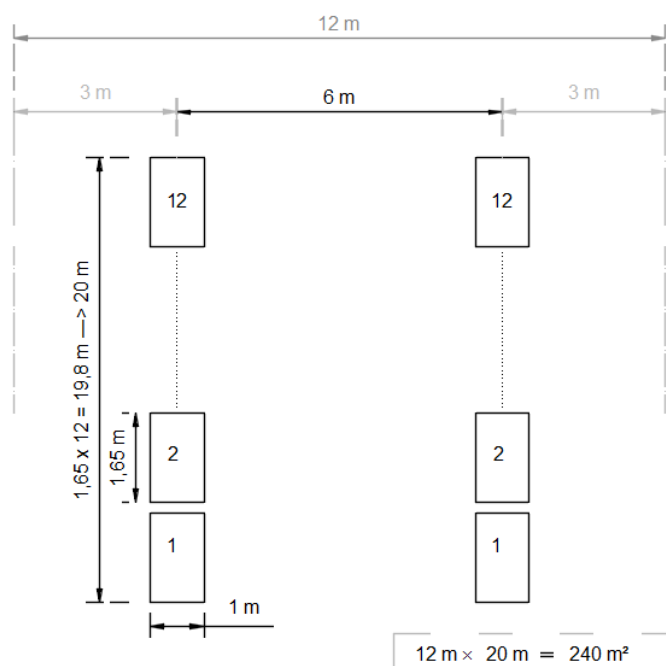


Figura 2. Vista en planta modificada* de la superficie correspondiente a dos hileras de paneles fotovoltaicos de la instalación agrivoltaica S6H4T3 (*modificación consistente en paneles proyectados en planta como si su ángulo de inclinación fuese nulo, para correspondencia con la fórmula de la GCR, o relación de cobertura del suelo).

3. Resultados y Discusión

3.1. Patrones de sombreado espacio-temporal

Se ha empleado el simulador SAM [5] para estimar la irradiación interceptada por el cultivo. Tanto H como S (Figura 3) afectan a la radiación que llega al suelo o al cultivo.

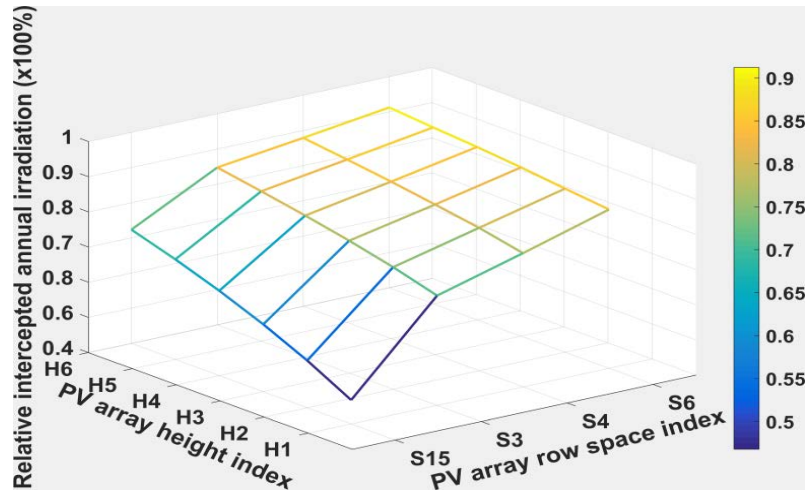


Figura 3. Resultado de la simulación con SAM [5] de la irradiación anual relativa interceptada por el cultivo en función de la separación entre hileras de paneles FV y su altura.

En promedio de las cuatro instalaciones comparadas, la desviación típica de la irradiación interceptada por el cultivo resultó del 12%, un valor mayor que el correspondiente a las seis alturas comparadas, 5,1%. De cara al diseño de instalaciones AV, esto sugiere que la separación entre hileras de paneles es más relevante que su altura.

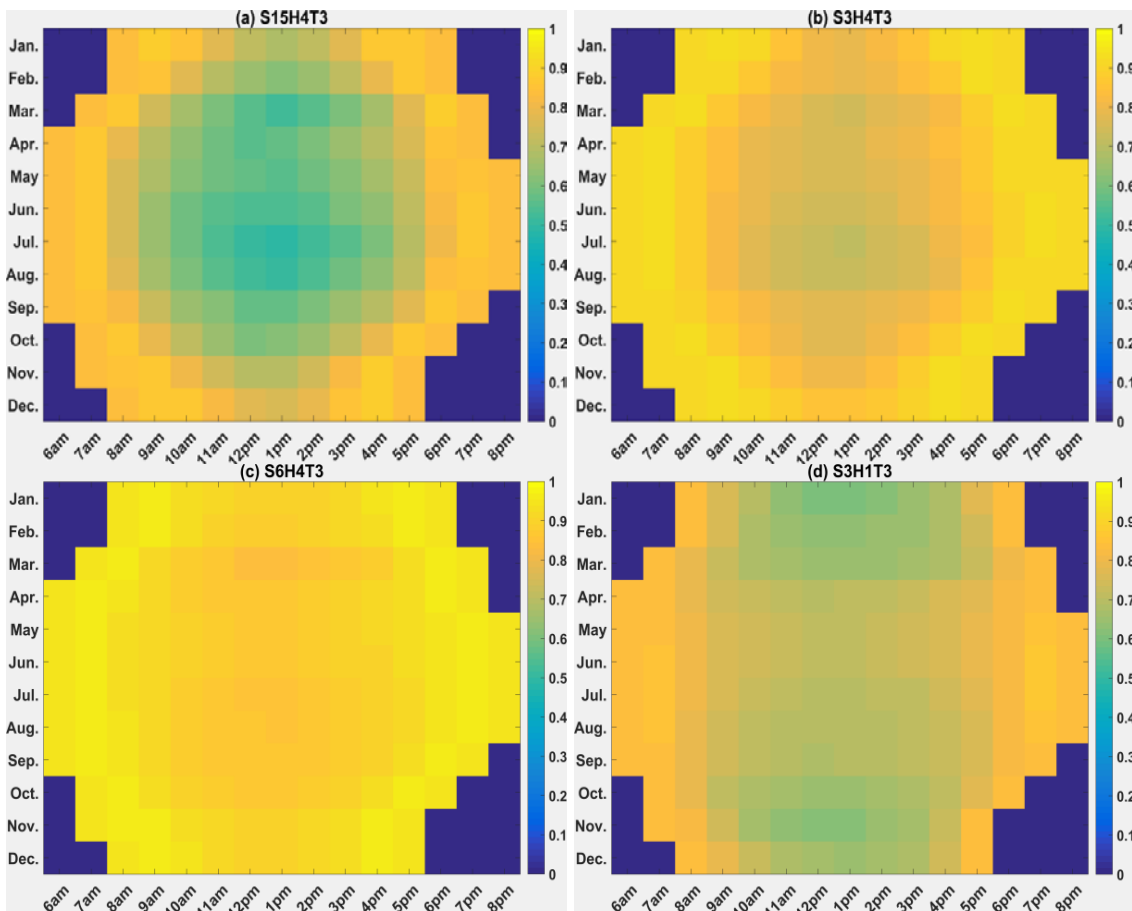


Figura 4. Fracción unitaria de irradiación interceptada por el cultivo en instalaciones AV con 30° de inclinación de paneles y de: (a) 1,5 m de separación S entre hileras de paneles y 4 m de altura H de los paneles; (b) 3 m de separación y 4 m de altura; análogo significado para (c) y (d).

La irradiación interceptada por el cultivo varía con el día-hora y la geometría de la instalación AV (Figura 4). Las instalaciones con la misma altura de paneles (H= 4 m en la Figura 4) muestran un patrón de sombreado temporal o cronológico similar. Esto se manifiesta en una menor irradiación disponible a nivel del suelo o del cultivo coincidiendo con la altura solar máxima (mediodía del solsticio de verano). En un día cualquiera del año, las instalaciones con la misma S pero distinta H (Figura 4 b y d) muestran un patrón de sombreado horario similar.

3.2. Estimación de la producción agrícola

La producción de trigo duro fue estimada mediante el simulador STICS [6]. Como datos para el modelo de simulación se estimó una densidad de cultivo de 221 plantas/m², explotación de regadío, tal que el agua no sea un factor limitante y tampoco lo sea el abonado nitrogenado. En la Tabla 2 se muestra el valor de *materia seca acumulada en el grano* obtenido para cada condición de cultivo (explotación AV), expresado en términos relativos respecto a uso del suelo solo para producción de trigo.

Tabla 2. Producción relativa de trigo duro de cuatro explotaciones agrivoltaicas respecto al uso exclusivo agrícola del suelo (trigo solo).

Explotación	Irradiación anual interceptada por el cultivo (%)	Producción de grano - materia seca- (%)
Trigo solo	100	100
S15H4T3	64,1	77,8
S3H1T3	71,2	82,7
S3H4T3	80,2	88,7
S6H4T3	89,2	93,9

Un aspecto a destacar de la Tabla 2 es que proporcionalmente la disminución del rendimiento es menor en comparación con la de la irradiación interceptada. Esto sugiere un posible aumento de la eficiencia del trigo duro en el aprovechamiento del recurso solar ante restricciones del mismo motivadas por el sombreado.

3.3. Estimación de la producción eléctrica

La producción eléctrica de tres explotaciones AV de 240 m², todas con una inclinación de paneles de 30° (Tabla 3), fue estimado con el simulador SAM [5].

Debido al menor auto-sombreamiento que acompaña a la disminución en la densidad de paneles, la correspondiente eficiencia del sistema FV se ve incrementada. Por ello, al comparar densidades de paneles que son doble unas de otras, la producción anual de energía eléctrica no es exactamente el doble (Tabla 3).

Tabla 3. Producción anual de energía eléctrica fotovoltaica e índices de eficiencia de tres explotaciones agrivoltaicas, para parcela de 240 m².

Explotación	EDC (kWh)	EAC (kWh)	Eficiencia del campo de paneles FV (%)	Eficiencia del sistema FV (%)	PR AC (%)
S15H4T3	31718	30215	10,80	10,29	74,03
S3H4T3	17731	16879	12,07	11,49	82,66
S6H4T3	8910	8479	12,13	11,55	83,09

3.4. Producción combinada agrícola-eléctrica

Para analizar la productividad conjunta del cultivo y la instalación FV, se ha utilizado el indicador conocido como *relación equivalente de suelo*, o *land equivalent ratio*, LER. Este índice, que típicamente toma valores en torno a 1, se utiliza habitualmente en asociaciones de cultivos como p. ej. las de tipo agroforestal. La expresión matemática de la LER para el caso que nos ocupa es, eq. [1] :

$$LER = \frac{Y_{\text{cultivo, AV}}}{Y_{\text{cultivo solo}}} + \frac{Y_{\text{electricidad, AV}}}{Y_{\text{electricidad, FV}}}$$

[1]

siendo Y la producción o rendimiento (en inglés, *yield*)

La idea subyacente en la LER es que para una determinada superficie de terreno disponible, p. ej., 2 ha, puede resultar globalmente más productivo compartir el uso del suelo entre el cultivo y los paneles FV elevados que destinar 1 ha a un campo de trigo y la otra 1 ha a un parque o 'huerto solar'.

Dado que la explotación AV S15H4T3 presenta la misma separación entre hileras de paneles que una planta FV convencional, su capacidad de producción eléctrica para una superficie de parcela AV de 240 m² es máxima. Suponiendo que el hecho de elevar 4 m los paneles sobre el suelo no altera la producción eléctrica en comparación con un parque solar convencional o S15H1T3 (quizá a 4 m el efecto perjudicial de las altas temperaturas sería menor, debido a la mayor velocidad del viento a esa distancia del suelo), ambas configuraciones se incluyen en la Tabla 4 como máximo al que referir las demás. Igualmente, la condición de *solo trigo* se toma como producción máxima a la que referir el resto.

A partir de los datos de las tablas 2 y 3 se ha obtenido la LER de cuatro explotaciones AV. Como se observa en la Tabla 4, las explotaciones AV son eficientes en el uso del suelo: Incluso la de menor densidad de paneles (S6H4T3), supone un aumento del 22% en dicha eficiencia. En particular, una ventaja productiva de una instalación o explotación AV es que en el periodo en el que la tierra descansa del cultivo, en nuestro caso desde la recolección del trigo hasta el comienzo de la preparación del suelo para la siguiente siembra (o la propia siembra si se practica *laboreo cero*), la parcela sigue produciendo energía eléctrica.

Tabla 4. Relación equivalente de suelo (LER) de cuatro explotaciones agrivoltaicas.

Sistema	Producción eléctrica relativa	Fracción unitaria de producción de grano - materia seca- respecto al máximo posible	LER
Trigo solo	0	1	1
Planta FV sin cultivo	1	0	1
S15H4T3	1	0,75	1,75
S3H1T3	0,56	0,82	1,38
S3H4T3	0,56	0,87	1,43
S6H4T3	0,28	0,94	1,22

4. Conclusiones

Se ha llevado a cabo una simulación de la producción concomitante de trigo duro y energía eléctrica para diferentes configuraciones de explotación agrivoltaica (AV), en Madrid. Se ha determinado que:

- El efecto de la separación entre hileras de paneles fotovoltaicos (FV) sobre la irradiación interceptada por el cultivo es mayor que el de la altura de los paneles
- En una explotación AV con una superficie de paneles FV del 17% del área de la parcela, el rendimiento de trigo duro disminuye un 6,1% respecto a un campo con solo el cultivo
- Para una superficie de paneles del 17% del área de la parcela, la productividad conjunta es un 22% mayor que con el cultivo y la instalación FV por separado, o lo que es lo mismo, se consigue la misma producción eléctrica y agrícola con un 22% menos de superficie si ambas actividades comparten terreno

Referencias

1. Goetzberger, A., Zastrow, A. On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1(1). 1982, 55-69.
2. 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. *Renewable Energy* 36(10). 2011, 2725-32.
3. Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *Europ. J. Agronomy*, 44. 2013, 54-66.
4. Commonwealth of Massachusetts. Solar Massachusetts renewable target program: Guideline regarding the definition of agricultural solar tariff generation units. 2018.
5. National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model v. 2017.1.17 (SAM 2017.1.17). NREL, Golden, Colo., USA. 2017.
6. Institut National de la Recherche Agronomique. STICS v. 8.41. Simulateur multIdisciplinaire les Cultures Standard (STICS application). INRA Paris, France. 2017.