



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural

Estudio de la influencia de la implantación de sistemas  
agrivoltaicos en el desarrollo del cultivo de la pitahaya y de  
la higuera.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural

AUTOR/A: Patiño Cantero, Manuel

Tutor/a: Reig Valor, Carmina

Cotutor/a: Agustí Fonfría, Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# **Título: Estudio de la influencia de la implantación de sistemas agrivoltaicos en el desarrollo del cultivo de la pitahaya y de la higuera.**

## **Resumen**

Dado que la pitaya en su hábitat natural se desarrolla en condiciones de semi-sombra, se recomienda que su cultivo se realice en instalaciones que ofrezcan entre un 30 % y un 50 % de sombreado, según la época del año, para no dañar las hojas y los frutos (Mizrahi and Khaimov, 2006). En este sentido, la implantación de un sistema de cultivo forzado que modifique, total o parcialmente, las variables ambientales y haga que el cultivo se desarrolle con cierta independencia resulta muy atractivo. Por otra parte, mejorar el cultivo de la higuera bajo cultivo protegido, intensificando la densidad de plantación mediante una técnica novedosa que permita producir higos y brevas de gran calidad fuera de estación, se plantea, también, como un objetivo comercial atractivo. La pitahaya engloba a un conjunto de plantas perennes de porte arbustivo, pertenecientes a la familia Cactaceae, originaria de Centroamérica, donde se desarrollan sobre el tronco de árboles o estructuras que las soportan y actúan como paraguas, reduciendo la radiación y creando un microclima óptimo para su desarrollo. Los requerimientos de su cultivo, por tanto, vienen dados por su lugar de procedencia, de modo que en la zona mediterránea se hace necesario el sombreado, siendo pertinente el uso de plásticos o mallas para conseguirlo. La higuera, pertenece a la familia Moraceae originaria de Asia Occidental. Es una planta leñosa que se adapta perfectamente al clima mediterráneo y no presenta grandes requerimientos edafoclimáticos adaptándose a diversas condiciones, pero su cultivo podría verse afectado por una reducción de la radiación. En este TFG se evalúa el crecimiento de la pitahaya y la higuera en cultivo forzado en un habitáculo con techo de placas solares. El objetivo es si en estas condiciones se satisfacen las exigencias lumínicas que precisan ambas especies para su cultivo. Para ello se evaluará el desarrollo vegetativo y reproductivo, el cuajado y el desarrollo del fruto de una variedad de higuera y de tres variedades de pitahaya en combinación con diferentes disposiciones de las placas solares.

Palabras clave: Pitaya; higuera; sostenibilidad; desarrollo vegetativo; floración; cuajado; desarrollo del fruto

Autor: Manuel Patiño Cantero

TUTORES: Carmina Reig Valor y Manuel Agustí Fonfría

Valencia, septiembre de 2023

## **Title: Study of the influence of the implementation of agroforestry systems on the development of pitahaya and fig tree cultivation.**

### **Abstract**

Given that pitaya in its natural habitat develops in semi-shaded conditions, it is recommended that its cultivation be carried out in facilities that offer between 30 % and 50 % shade, depending on the time of year, so as not to damage the leaves and fruit (Mizrahi and Khaimov, 2006). In this sense, the implementation of a forced cultivation system that modifies, totally or partially, the environmental variables and makes the crop develop with a certain degree of independence is very attractive. On the other hand, improving the cultivation of fig trees under protected cultivation, intensifying the planting density by means of a novel technique that allows the production of high quality figs and fig berries out of season, is also an attractive commercial objective. Pitahaya is a group of perennial shrubby plants belonging to the Cactaceae family, native to Central America, where they grow on the trunks of trees or structures that support them and act as umbrellas, reducing radiation and creating an optimum microclimate for their development. The requirements of its cultivation, therefore, are given by its place of origin, so that in the Mediterranean area shading is necessary, being pertinent the use of plastic or nets to achieve it. The fig tree belongs to the Moraceae family, originally from Western Asia.

Keywords: Pitaya; fig tree; sustainability; vegetative development; flowering; fruit set

## Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Cultivo de la pitahaya.....	4
1.1.1. Importancia económica del cultivo de la pitahaya .....	4
1.1.2. Clasificación agronómica y botánica de la pitahaya.....	4
1.1.3. Adaptación ecológica .....	5
1.2. Cultivo de la higuera .....	6
1.2.1. Importancia económica del cultivo de la higuera. ....	6
1.2.2. Clasificación agronómica y botánica de la higuera. ....	7
1.2.3. Adaptación ecológica. ....	8
1.3. Los sistemas agrivoltaicos. ....	8
2. OBJETIVOS .....	10
2.1. Objetivos de Desarrollo sostenible .....	10
3. MATERIALES Y METODOS .....	11
3.1. Material vegetal.....	11
3.2. Análisis estadístico.....	14
4. Resultados y discusión.....	15
4.1. Influencia de la instalación de un sistema agrivoltaico en el comportamiento agronómico de 3 variedades de pitahaya.....	15
4.1.1. Influencia del sistema agrovoltaico en la brotación y desarrollo vegetativo.....	15
4.1.2. Influencia del sistema agrovoltaico en la floración. ....	24
4.2. Influencia de la instalación de un sistema agrivoltaico en el comportamiento agronómico de la higuera.....	29
4.2.1. Influencia del grado de sombreado sobre el desarrollo vegetativo.....	29
4.2.2. Influencia del grado de sombreado sobre el desarrollo reproductivo .....	31
5. Conclusión .....	34
BIBLIOGRAFÍA .....	35

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1. Cultivo de la pitahaya

### 1.1.1. Importancia económica del cultivo de la pitahaya

La pitahaya, es una fruta tropical cultivada ampliamente en Sudamérica y en el continente asiático. En 2018, según Wakchaure (2021), la superficie mundial dedicada al cultivo de esta planta se situó en torno a las  $112 \times 10^3$  ha, con una producción superior a  $2,1 \times 10^6$  t. Vietnam, con  $10,7 \times 10^5$  t, fue el mayor productor, seguido de China ( $700 \times 10^3$  t) e Indonesia ( $221 \times 10^3$  t), contribuyendo estos países a más del 93% de la producción mundial. En Sudamérica, el cultivo de pitahaya se concentra principalmente en Colombia ( $13,25 \times 10^3$  t), Ecuador ( $11,6 \times 10^3$  t) y México ( $9 \times 10^3$  t). Recientemente se ha introducido su cultivo en India, Australia y Sudáfrica, así como en algunas regiones de Europa y Norteamérica. En España, en 2020, según datos de Mercamadrid, se produjeron 57 t. La región de Murcia (18 t) junto con la Comunidad Valenciana (18 t) fueron las máximas productoras, seguidas por las Islas Canarias (10.9 t) y Andalucía (9.2 t). Recientemente su cultivo se ha extendido a Badajoz y Lugo.

### 1.1.2. Clasificación agronómica y botánica de la pitahaya

La pitahaya, *Hylocereus* spp, pertenece a la familia *Cactaceae*, subfamilia *Cactoidea*, orden Caryophyllales. Son plantas perennes, hemipífitas, con tendencia trepadora y tallos suculentos (cladodios) en los que las hojas se han transformado en areolas, rodeadas por un grupo de espinas.

La familia de las Cactáceas presenta entre 120 y 200 géneros que constan de entre 1500 y 2000 especies situadas principalmente en las zonas tropicales cálidas y semidesérticas de América Latina. Los géneros más representativos son *Hylocereus* (pitahaya roja), *Selenicereus* (pitahaya amarilla) y *Stenocereus* (pitahayas rojas y amarillas) (Le Bellec *et al.*, 2011).

Las especies que conforman el género *Hylocereus* se caracterizan por ser trepadoras, de cladodios triangulares y con los bordes de las aristas entre las areolas convexos, sobre los que se desarrollan raíces aéreas. Los frutos (bayas) son de tamaño variable, sin espinas e indehiscentes, con brácteas de color verde y pulpa roja o blanca, según la especie. Las especies de este género son las de mayor repercusión en el mercado mundial, destacando las siguientes: *Hylocereus purpussi*, *Hylocereus polyrhizus*, *Hylocereus costaricensis*, *Hylocereus undatus* e *Hylocereus trigonus*.

El género *Selenicereus* es similar al *Hylocereus*, con algunas diferencias. En efecto, también son plantas trepadoras, con tallos formados por 4 o más aristas, pero, en este caso, el borde de las aristas entre areolas es cóncavo. Su fruto es indehiscente, amarillo y con espinas. Dentro de este género se encuentra la especie *S. megalanthus*, de gran importancia económica en Sudamérica.

Las especies del género *Stenocereus* no presentan hábito trepador debido a que los tallos son rígidos, similares a columnas. Sus frutos, de color rojo o verde, variable en el momento de maduración, son de menor tamaño, con espinas y dehiscentes.

### 1.1.3. Adaptación ecológica

La pitahaya tiene una gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones, tanto climáticas como edáficas: muestra tolerancia al déficit hídrico, a la temperatura y a los suelos pobres. Esto es debido a las modificaciones que presenta respecto a otras plantas, tales como tallos o cladodios adaptados para la acumulación de agua y recubiertos por sustancias cerosas, la presencia reducida o nula de hojas, siendo también característico el metabolismo ácido propio de las crasuláceas (CAM), como lo son estas especies (Raveh y Gersani, 1995).

La temperatura óptima para el desarrollo de la pitahaya oscila entre los 16°C y 25°C, típica de los climas tropicales y subtropicales de donde es originaria. Tolera temperaturas de hasta 45°C, si bien a partir de 38°C se produce una reducción en la floración y, además, pueden sobrevenir daños sobre los tallos que, sin embargo, vuelven a crecer rápidamente cuando se someten a temperaturas menores. Por otra parte, es sensible a las bajas temperaturas, de modo que por debajo de los 10°C se ralentiza su desarrollo y con temperaturas inferiores a 4°C aparecen los primeros daños en forma de lesiones redondas; también en este caso los tallos se recuperan rápidamente cuando la temperatura aumenta (Mizrahi y Nerd, 1999). El límite mínimo para su cultivo se ha situado en torno a los -2°C, produciéndose la muerte celular cuando la temperatura se sitúa por debajo de los -4°C.

La pitahaya es originaria de los bosques tropicales y subtropicales de América del sur donde se desarrolla trepando por los árboles que actúan como paraguas, reduciendo así la radiación solar que incide sobre la planta, por lo que está adaptada a hábitat sombríos. Por este motivo, cuando las plantas son sometidas a radiaciones intensas, los tallos sufren diversos daños, como decoloraciones o secado.



**Fig. 1:** Daños producidos por el exceso de radiación sobre un cladodio de *Hylocereus Undatus*

Por el contrario, si el sombreado es elevado la floración se reduce y, en consecuencia, la producción, de manera que para su cultivo es necesario un cierto grado de sombreado, cuantificado entre el 30% y el 60%, según las especies (Mizrahi *et al.*, 1997). Estos requerimientos están condicionados por la presencia de capas cerosas que recubren el tallo, varían con las diferentes especies, y dependen, también, del estado hídrico en el que se encuentran las plantas, de manera que, si están sometidas a estrés hídrico, su resistencia a la radiación solar se reduce.

Como muchos cactus, la pitahaya presenta unos bajos requerimientos hídricos, lo cual se ha relacionado con el metabolismo CAM. Es, por tanto, una planta resistente a la sequía, aunque presenta una respuesta positiva al riego que resulta clave en el periodo de floración y en las fases del desarrollo del fruto. Por el contrario, el exceso de humedad puede causar la caída de flores y frutos, además de favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas. También se ha observado que los tratamientos secos inducen floraciones tempranas. Según Mizrahi (2007), sus necesidades hídricas se han estimado entre 120 y 160 mm anuales, aplicados en forma de pequeños y frecuentes caudales distribuidos durante los periodos secos. La razón de ello es el sistema radicular poco profundo de estas especies, por lo que el riego con grandes cantidades de agua resulta ineficaz y el agua se pierde.

Debido a que el cultivo de la pitahaya es todavía poco conocido, no existen muchos datos sobre sus exigencias nutricionales. No obstante, se sabe que el uso de fertilizantes inorgánicos influye positivamente en el crecimiento y productividad de la planta. Es exigente en K, sobre todo durante la floración y el desarrollo del fruto, y en menor cuantía, en N, para el desarrollo radical, el crecimiento vegetativo y el cuajado de flores. Por el contrario, es poco exigente en P para estimular la floración y fructificación. En Canarias, los programas de fertilización recomiendan aplicar una formulación nutricional 1-0,2-1,5-0,5(CaO), a una concentración en el agua de riego de 0,150 g/l.

La pitahaya se adapta a una gran variedad de suelos de distinta profundidad, pedregosos y con diferentes grados de alcalinidad y salinidad. No obstante, los mayores rendimientos se han obtenido en suelos francos, con un elevado contenido en materia orgánica y con pH entre 5,5-6,5.

Su cultivo es sensible a los excesos de humedad que favorecen la aparición de enfermedades fúngicas, por lo que se deben evitar los suelos con un drenaje deficiente. Por otro lado, estas especies también muestran una buena tolerancia a la salinidad, hasta valores de CE de 10 dS/m, si bien con una cierta tendencia a un menor desarrollo de los brotes conforme aumenta ésta (Barcenas-Abogado,2002).

## 1.2. Cultivo de la higuera

### 1.2.1 Importancia económica del cultivo de la higuera

En la actualidad, los principales países productores se localizan en la cuenca Mediterránea, si bien Irán, Estados Unidos y Brasil son también países productores de higos. En 2021, según datos de la FAOSTAT, la superficie mundial se situaba en torno a las 300.000 ha, con una producción  $1.35 \times 10^3$  t anuales. Turquía es el principal productor, con  $320 \times 10^3$  t anuales, seguido de Egipto, Marruecos, Argelia e Irán. En Europa, el mayor productor es España, con 60.000 t, que representan el 50% de la producción europea, seguido por Albania (24.000 t), Italia (13.000 t), Grecia (8.000 t), Francia (6.500 t) y Portugal (5.000 t).

En 2022, según datos de ESYRCE, España dedicaba 23.000 ha al cultivo de esta especie, repartidas por Extremadura (61%), Islas Baleares (12%), Andalucía (9%), Castilla-La Mancha (8%), Comunidad Valenciana (3%) y Cataluña (2%).

### 1.2.2. Clasificación agronómica y botánica de la higuera

La higuera pertenece al orden Urticales, familia *Moraceae*, subfamilia *Hamamelidae*. Dentro del género *Ficus* se diferencian unas 750 especies, nativas de los trópicos.

Es un árbol caducifolio que puede alcanzar los 10 m de altura, aunque, en condiciones de cultivo, no suele superar los 5 m. Presenta un sistema radical fasciculado, abultado, superficial, con raíces fibrosas y robustas. El tronco suele ser corto, con tendencia basítona, formando varios tallos que surgen del cuello de la raíz, de color gris ceniza. Las hojas son alternas, de gran tamaño, poseen de 3 a 5 lóbulos y, normalmente, están divididas y acorazonadas en la base y con nerviación palmeada. Las yemas, terminales o axilares, son grandes y puntiagudas. Las flores se disponen en las paredes internas de un receptáculo carnoso, denominado sicono, con una única salida al exterior, el poro distal, próximo al cual se sitúan las flores masculinas mientras que las femeninas se colocan en el fondo.

Se trata de una especie dioica en la que se distinguen dos tipos de formas florales femeninas y un tipo de flor masculina. Según Agustí (2022), Las higueras macho presentan flores masculinas y femeninas de estilo y estigma cortos, dando lugar a frutos fibrosos no aptos para consumo. Estas higueras reciben el nombre de *cabrahigos*. Mientras que en las higueras hembra únicamente aparecen flores femeninas de estilo y estigma largo que dan lugar a frutos comestibles.

Estas higueras hembra se denominan higueras cultivadas y, dentro de ellas, se distinguen dos grupos:

- Las de tipo *común*, de desarrollo partenocárpico, que se dividen en variedades bíferas o reflorecientes y variedades uníferas. Las bíferas desarrollan dos cosechas al año: la primera da lugar a brevas, que son frutos muy apreciados por su tamaño y época de maduración; y la segunda cosecha, que generalmente es más abundante, produce higos. Por su parte, las variedades uníferas únicamente dan lugar a una cosecha, los higos. Es de señalar que estos últimos, los higos, son frutos que se originan sobre la madera del año, desarrollándose durante el verano, mientras que las brevas se originan en la madera del año anterior donde permanecen desde el invierno hasta la primavera, cuando el crecimiento de los siconos continúa.

- Las de tipo *Esmirna*, que requieren de la polinización (caprificación) para la maduración del sicono; éstas únicamente dan lugar a una tanda de frutos (uníferas) que se desarrollan sobre madera del año (higos). Estos frutos son los recomendados para el secado, siendo muy importantes en Turquía.

Los *cabrahigos* o higueras silvestres, aunque no producen frutos comestibles, son necesarias para la polinización de las higueras de tipo Esmirna.



### 1.2.3. Adaptación ecológica.

La higuera es capaz de vegetar en condiciones climáticas diferentes. Sin embargo, el óptimo para su crecimiento se encuentra en los climas cálidos y templados del hemisferio norte, entre los 35º y 40º de latitud y un máximo de 1200 de altitud.

Presenta unos bajos requerimientos en horas frío que se han estimado en torno a 400 unidades HF. Sin embargo, las bajas temperaturas durante el invierno, inferiores a -12ºC, provocan la muerte del árbol y temperaturas entre -6ºC y -7ºC son perjudiciales para los frutitos en desarrollo (brevas). En los inviernos suaves, en los que las temperaturas mínimas no bajan de los 6ºC y 10ºC, la higuera no entra en latencia, vegetando continuamente.

Sus necesidades de calor acumulado son de 2200ºC, para la maduración de las brevas, y entre 3500ºC y 4000ºC, para los higos, siendo el óptimo 25ºC. Con temperaturas superiores a los 37,7ºC se produce la caída de los frutitos.

Muestra una gran capacidad de adaptación a multitud de suelos, a excepción de los que presentan un drenaje deficiente. Los suelos en que mayor rendimiento se ha obtenido, son suelos profundos que retienen la humedad, con alto contenido en Ca, un pH entre 8 y 8,5, calientes y ricos en nutrientes.

Presenta una tolerancia media a la salinidad. Puede resistir conductividades eléctricas de hasta 3,8 dS/m sin pérdida de frutos apreciables, mientras que con una conductividad de 5,5 dS/m se producen pérdidas del orden del 25% de la cosecha.

Es tolerante a la sequía, sus necesidades hídricas se sitúan entre las 600-700 mm anuales. Los mayores requerimientos se registran tras la primera cosecha. Excesos de humedad causan higos demasiados gruesos y acuosos que se pudren con facilidad, siendo, además, sensible a la podredumbre apical (Agustí, 2022)

### 1.3. Los sistemas agrivoltaicos.

El cambio climático es uno de los problemas más graves que afectan a la sociedad actual. El principal motor del calentamiento de nuestro planeta son los gases de efecto invernadero provenientes de los combustibles fósiles por lo que resulta imprescindible reducir la emisión de dichos gases. El problema no tiene fácil solución si tenemos en cuenta que alrededor del 80% de la energía total consumida es producida por los combustibles fósiles.

Este hecho ha impulsado el establecimiento de una serie de normas por parte de la Unión Europea, dirigidas a los países miembros, con el fin de reducir las emisiones de GEI (Plan nacional integrado de energía y clima o PNIEC). Las medidas que contempla el PNIEC son las siguientes:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero
- Incrementar el uso de energías renovables sobre el uso final de la energía
- Mejorar la eficiencia energética

En este contexto, la energía solar fotovoltaica presenta un gran potencial debido a las elevadas eficiencias de conversión de energía solar a eléctrica que poseen estos sistemas (Pearce et al. 2002). Sin embargo, la implantación de estas técnicas en grandes superficies de terreno puede provocar la pérdida de tierra cultivable. Para solucionar este conflicto de intereses por el uso de la tierra, se han propuesto los sistemas agrivoltaicos que se basan en el uso combinado de la tierra para la generación de energía y para la producción de alimentos. (Dupraz *et al.*, 2010).

Debido al rápido auge que ha experimentado en los últimos años, en España no se ha establecido todavía ninguna Ley que regule los sistemas agrivoltaicos, mientras que en países donde se tiene mayor conocimiento sobre esta tecnología, como Italia, Francia o Alemania, sí existe una regulación al respecto. Atendiendo a la normativa vigente en Alemania DIN SPEC 91434:2021-05, las granjas solares se dividen en dos clases: Instalaciones agrivoltaicas, con un soporte elevado cerca del nivel de suelo, y las instalaciones agrivoltaicas con un soporte elevado con altura libre. Las primeras se diseñan buscando la mayor eficiencia energética sin tener en cuenta el componente agrícola; la tierra dedicada al cultivo se encuentra bajo los módulos fotovoltaicos o en el terreno existente entre las filas de paneles. Las segundas son sistemas diseñados intencionadamente para la coproducción de cultivos y energía eléctrica, buscando el beneficio mutuo. Dentro de este último grupo, se encuentran los invernaderos fotovoltaicos con grandes avances en el sur de Europa, especialmente en España e Italia (Cossu *et al.*, 2014). En estos invernaderos, la implantación de células fotovoltaicas en el techo permite obtener energía para el control del entorno del habitáculo, teniendo un impacto de cero de emisiones, o aumentar los beneficios del agricultor con la venta de la energía.

Inicialmente, la implementación de los sistemas agrivoltaicos se han centrado en el estudio de su efecto sobre cultivos hortícolas y extensivos. En el caso de los cultivos leñosos, no ha sido hasta los últimos años cuando se han comenzado a desarrollar aplicaciones para uso en frutales como perales, frutos rojos, manzanos y vides, siendo los datos muy limitados. El principal desafío que plantean estos sistemas es conciliar la producción de alimentos y la producción de energía eléctrica. Este hecho está relacionado con la colocación de la matriz fotovoltaica en el techo, creando unas condiciones de sombra que, generalmente, van en detrimento del rendimiento del cultivo. Esta disminución ya se observó en el manzano cultivado bajo paneles fotovoltaicos, en los que la reducción de la radiación condujo a un menor número de brotes florales, y, por tanto, a una menor producción, como consecuencia del alto grado de cobertura que ofrecían los paneles sobre el cultivo (Juillion *et al.*, 2022). Algo similar ocurrió en la vid, reduciéndose el número de bayas por racimo (Ferrara *et al.*, 2023). No obstante, este factor de cobertura sí puede tener un efecto positivo sobre determinados cultivos, en los que elevados niveles de radiación causan daños reduciendo la tasa fotosintética de las hojas, como es el caso de la pitahaya. Además, interacciona con las condiciones micro climáticas del invernadero, reduciendo la temperatura del aire y aumentando la humedad relativa, lo que disminuye la evotranspiración con el consiguiente ahorro de agua. Esto implica que los sistemas agrivoltaicos pueden actuar contrarrestando los efectos negativos inducidos por los gases de efecto invernadero, y, además, se evidencia el potencial que presentan en climas áridos y desérticos.

Teniendo esto en cuenta, el planteamiento de este trabajo se ha vinculado al Proyecto Estratégico en Cooperación (INNEST-2022-77) promovido por la Agencia Valenciana de la Innovación (AVI), con el objeto de que se desarrolle y contextualice en un Proyecto real.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia que la implantación de un sistema agrivoltaica tiene en el cultivo de la pitahaya y de la higuera bajo invernadero, con el fin de evaluar su viabilidad.

### 2.1 Objetivos de Desarrollo sostenible

Este trabajo se alinea con los ODS 2 (hambre cero), ODS 7 (energía asequible y no contaminante), ODS 8 (trabajo decente y crecimiento económico) y ODS 13 (acción por el clima). Este proyecto estudia la influencia del sombreado impuesto por paneles solares sobre dos cultivos, lo cual, permite un doble uso de la tierra, por un lado, para la generación de energía no contaminante, que puede ser utilizada para satisfacer las necesidades energéticas de la propia explotación o su venta a la red eléctrica, y, por otro lado, para la producción de alimentos. Este hecho, permite al agricultor establecer cultivos en zonas, en las que debido a la alta radiación solar incidente y a las altas temperaturas no se obtenía rentabilidad, mientras que gracias a la generación energética y su posterior venta, permiten al agricultor obtener rentabilidad, aumentando la superficie cultivable, sobre todo en zonas desérticas y áridas

### 3. Materiales y métodos

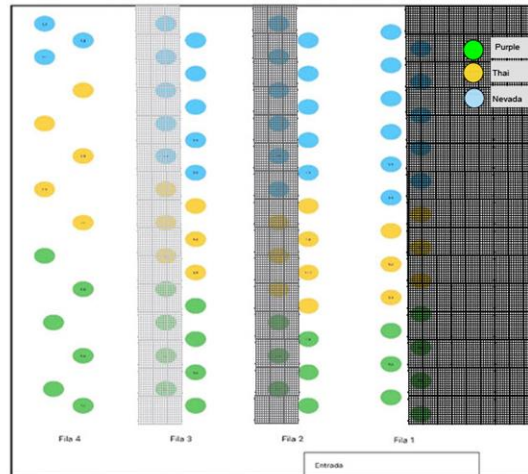
#### 3.1. Material vegetal

El estudio se llevó a cabo en el centro experimental “Picassent Solar”, ubicado en el término municipal de Picassent (Valencia, España), en un invernadero multitunel de plástico con ventanas de metro cincuenta, revestidas con malla antritrip de 16 X 10 hilos/cm<sup>2</sup> y un sistema agrivoltaico de paneles solares de máxima densidad que generan la máxima cantidad de energía y el mayor grado de sombreamiento al cultivo en detrimento de la entrada de luz al interior del habitáculo (Fotog. 2).



**Fotog. 2:** Disposición de la estructura agrivoltaica de máxima densidad con paneles solares en el cultivo de la pitahaya (*H. undatus*).

En su interior se trasplantaron entre 24 y 34 plantas de pitahaya (*Hylocereus Undatus*) de tres variedades diferentes; “Purple”, “Thai” y “Nevada”, de 2 años de edad, con un marco de plantación al tresbolillo de 3,5 x 0,5m, entutoradas con una caña y con riego localizado por goteo y fertirrigación. Las plantas se repartieron en 4 filas diferentes, dejando de 6 a 10 plantas de cada variedad por fila, según la disposición de los paneles, y, por tanto, del grado de sombreamiento. En las tres primeras filas, las plantas quedaron por debajo de los paneles solares, quedando sometidas, por tanto, a diferentes grados de sombreamiento, según la inclinación del sol. La cuarta fila, sin placas solares, y por consiguiente, sin sombreado, se utilizó como control. (Fig. 1)



**Fig. 1.** Disposición de las plantas de pitahaya (*H. Undatus*) y de los paneles solares del sistema agrivoltaico

Se seleccionaron, aleatoriamente, tres plantas por fila de cada variedad, de tamaño y vigor similar, a las que se les evaluó, periódicamente al inicio de la brotación, el número de brotes emitidos, así como su longitud. En todos los casos, se distinguieron en cada planta los cladodios orientados al sol y a la sombra, con el fin de evaluar la influencia que la intensidad lumínica pudiera tener en estos parámetros.

Para evaluar el desarrollo reproductivo, se anotó, periódicamente, el número de flores por planta que iban surgiendo, desde la primera ola de floración hasta la última.

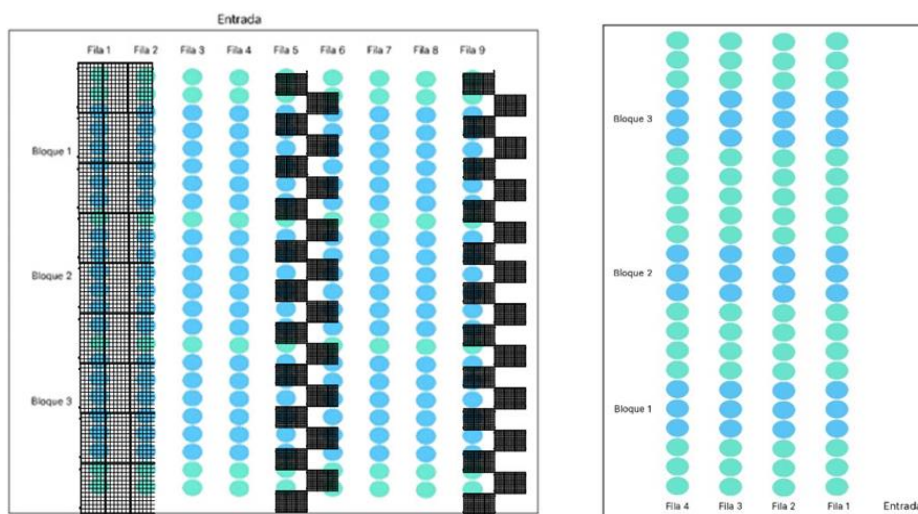
Paralelamente, en otro invernadero colindante de características similares, se instalaron dos sistemas agrivoltaicos de densidades diferentes; el de máxima densidad, idéntico al descrito para la pitahaya, y el de densidad media, en el que la configuración de las placas solares es al tresbolillo, permitiendo pasar una mayor cantidad de radiación solar al interior y reduciendo la cantidad máxima de energía generada, y por tanto, el grado de sombreamiento (Fotog. 3). En este caso, como control se utilizó otro invernadero próximo, cubierto únicamente por una malla de polietileno transparente.



**Fotog. 3:** Disposición de la estructura agrovoltáica en la higuera con paneles de máxima densidad y al tresbolillo.

La variedad bífera de higuera utilizada fue la “Dalmatie”, en un sistema superintensivo, trasplantando plántones procedentes del vivero a macetas de 35l con sustrato a base de mezcla de fibra de coco, turba y perlita, utilizando riego por goteo, con manejo de la solución nutritiva y óptimas condiciones fitosanitarias. Las plantas, en el invernadero con placas, se disponían en nueve filas con veinticuatro plantas cada una, con una distancia entre hileras de 2 m y 0,5 m entre plantas. Las dos primeras filas se encontraban bajo la máxima densidad de paneles, las filas 5, 6 y 9 estaban sometidas a la configuración en tresbolillo de las placas solares y las filas 3, 4, 7 y 8 no se encuentran sombreadas, ya que quedaban en el pasillo entre las dos disposiciones de los paneles (Fig. 2). En el invernadero control (sin placas), las plantas se disponían en cuatro filas de igual manera que en el invernadero con placas

Para estudiar su comportamiento agronómico, en el invernadero con placas, cada hilera de plantas se dividió en tres bloques de seis plantas, dejando una distancia de separación con los extremos de dos plantas y una entre bloques contiguos. En el invernadero control, se realizaron tres bloques de tres plantas cada uno por cada fila.



**Fig. 2.** Disposición de las plantas de higuera (*F. carica*) y de los paneles solares del sistema agrovoltáico (A) y disposición de las plantas en el invernadero sin placas o control (B).

En el momento de la brotación se evaluó, semanalmente, el número de brotes emitidos en nueve plantas repartidas en tres bloques por fila, así como el número medio de hojas de los tres primeros brotes, es decir, de aquellos localizados en orden descendente desde el ápice. También se midió la longitud de los entrenudos y el contenido en clorofilas de las hojas. Para ello, se utilizó una cinta métrica y el SPAD-502Plus. En cuanto al desarrollo reproductivo, se evaluó, periódicamente, el número de flores de los tres primeros brotes desde el inicio de la floración.

### 3.2. Análisis estadístico

A los datos obtenidos se les aplicó el análisis de la varianza con un nivel de confianza de  $P \leq 0.05$ . Para la separación de las medias se aplicó el test Student-Newman-Keuls mediante el programa "Statgraphics Centurion XVII". A los porcentajes, para normalizar la población, se les aplicó la transformación de  $\text{arc sen}(\sqrt{p})$ .

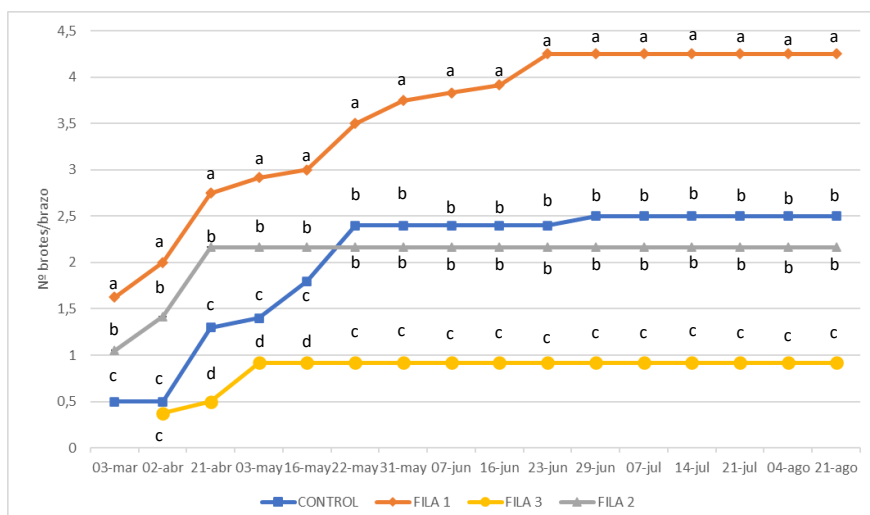
## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Influencia de la instalación de un sistema agrivoltaico en el comportamiento agronómico de 3 variedades de pitahaya

#### 4.1.1. Influencia del sistema agrivoltaico en la brotación y desarrollo vegetativo

La implantación de un sistema agrivoltaico en el cultivo de la pitahaya, formado por paneles solares en máxima densidad, alteró el desarrollo vegetativo de la planta. Esto fue mayor en cuanto más sombreadas se encontraron las plantas, en función de su ubicación (fila) respecto de los paneles (Fig. 3). Así, la Fila 1 (la más sombreada por situarse debajo de los paneles) fue la que mayor número de brotes/brazo tuvo (4,2) respecto a las Filas 2 y 3 que tuvieron 2,27 y 0,92 brotes por brazo, respectivamente, y del control, que fue de 2,5 (Fig. 3). La velocidad de brotación también se vio afectada por el sombreado generado por los módulos fotovoltaicos. Así, el 3 de mayo, mientras en la Fila 1 había casi 3 nuevos brotes, en la Fila 2 y el control había alrededor de 2,2 y en la Fila 3 apenas 1 (Fig. 3)

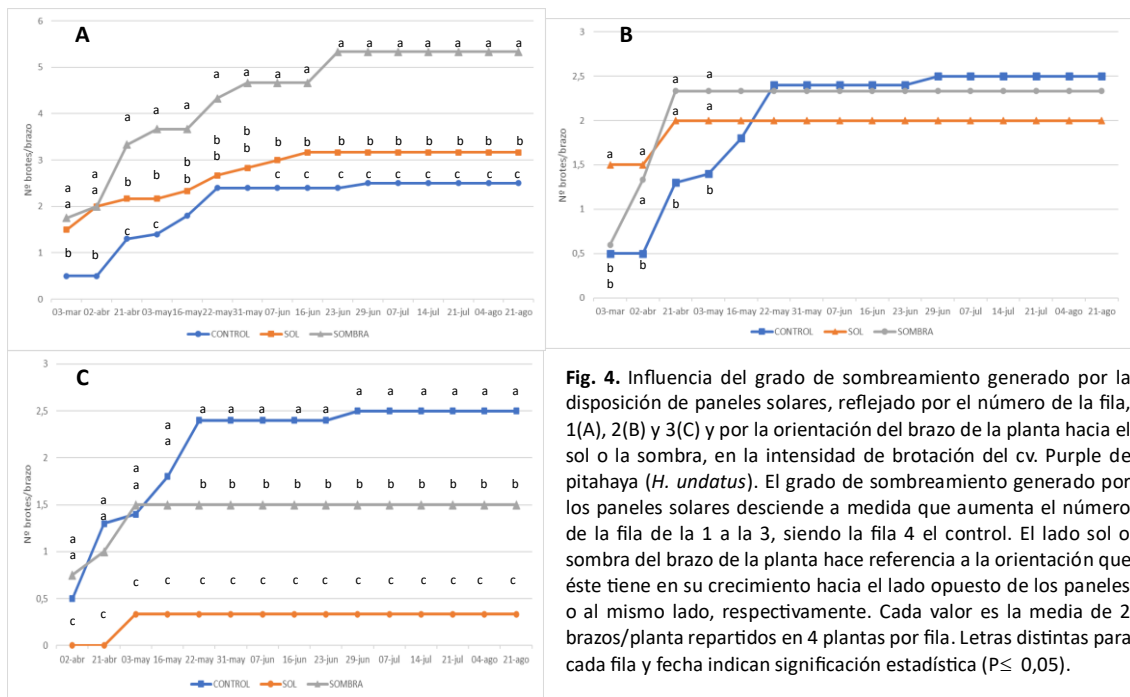
Por otra parte, mientras en las Filas 2 y 3, en las que las plantas estaban menos sombreadas por no encontrarse debajo de los paneles, al igual que en el control, la brotación se mantuvo prácticamente constante a partir del 3 de mayo, en la Fila 1, la más sombreada, por el contrario, siguió aumentando hasta el 29 de junio y después se mantuvo constante hasta el final del estudio. En consecuencia, el número de brotes en esa fecha fue significativamente mayor en la Fila 1 (4,2), que en la Fila 2 y control (2,5) y la Fila 3 (0,9) (Fig. 3).



**Fig. 3.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de brotación del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

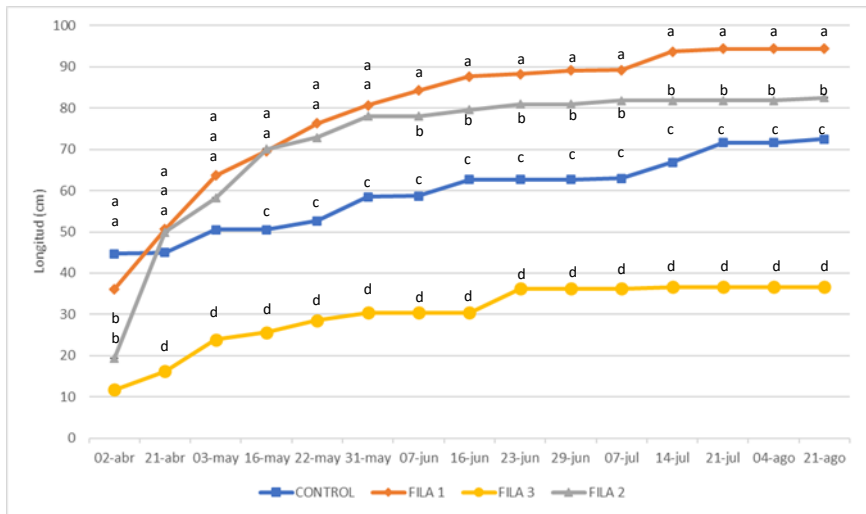


La orientación del brazo de la planta, hacia la zona más sombreada o más soleada, dentro de la misma fila, también influyó en el número de brotes por brazo. Así, en la Fila 1, la más sombreada, los brazos orientados hacia la sombra emitieron significativamente un mayor número de brotes (5,3), que los que se encontraban orientados al sol (3,2) y respecto del control que fue de 2,5 (Fig. 4A). Sin embargo, esta tendencia no se observó en la Fila 2, en la que el número de brotes fue similar en los brazos orientados al sol, a la sombra y el control (Fig. 4B). En la Fila 3, la menos sombreada por su ubicación respecto a los paneles, si se observó un mayor número de brotes en los brazos orientados a la sombra (1,5) con respecto a los orientados al sol (0,33), pero en ambos casos significativamente menor que el control (2,5) (Fig. 4C).



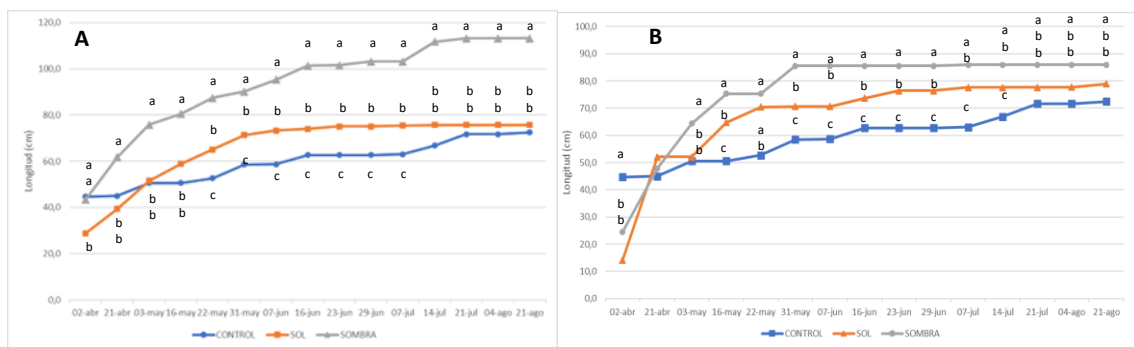
**Fig. 4.** Influencia del grado de sombreadamiento generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de brotación del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreadamiento generado por los paneles solares descende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

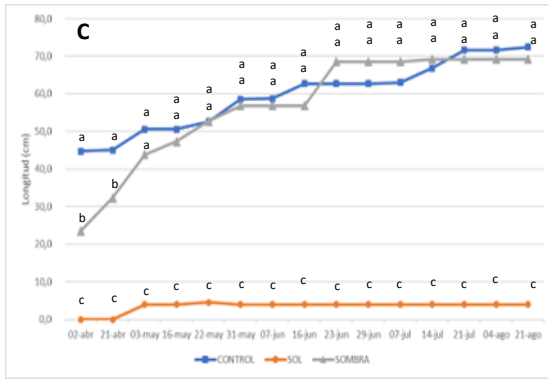
La longitud de los brotes emitidos, en la variedad "Purple", también se vio influenciada por la presencia de los paneles solares, y con ello, del grado de sombreadamiento generado por ellos. Al igual que en la intensidad de brotación, la longitud media de los brotes fue mayor (92 cm) en la Fila 1, la cual presentó el mayor grado de sombreadamiento debido a la configuración de los paneles solares, en comparación con el resto. Los brotes de las plantas ubicadas en la Fila 2 y, por tanto, las de un grado de sombreadamiento intermedio, les siguieron de cerca, alcanzando una longitud de 81,3 cm pero significativamente menores. Los brotes de las Filas 3 y 4 (control) midieron 36,1 cm y 72,5 cm, respectivamente, siendo en ambos casos significativamente menores a los anteriores (Fig. 5). Cabe destacar, el rápido crecimiento que experimentaron los brotes de las plantas situadas bajo los paneles fotovoltaicos, Filas 1 y, en menor medida la 2, en comparación con los de la Fila 3 y el control.



**Fig. 5.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la longitud de los brotes del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado descende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 4 brotes/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

La orientación del brazo de la planta, hacia la zona más sombreada o más soleada, dentro de la misma fila, también influyó en la longitud de los brotes. Así, tanto en la Fila 1 como en la Fila 2, los brotes orientados en su crecimiento hacia la sombra, alcanzaron una mayor longitud (113 cm y 84 cm), respectivamente, que los orientados al sol o control que fue prácticamente la misma (76 cm y 79 cm), respectivamente (Figs. 6A y 6B). Sin embargo, en la Fila 3, los brotes orientados a la sombra y el control no difirieron en longitud (72 cm) y fueron significativamente más largos que los orientados al sol de esta misma fila que apenas crecieron (5 cm) (Fig. 6C).

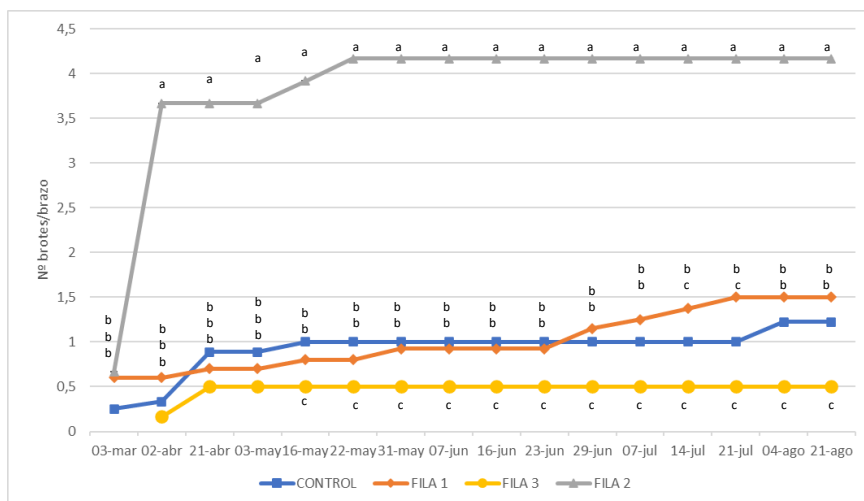




**Fig. 6.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la longitud de los brotes del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 4 brotes/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

El factor de que las plantas (efecto Fila) y/o tallo (efecto orientación brazo) sometidos a un mayor grado de sombreado, presenten, en general, un mayor número de brotes, así como una mayor longitud de los mismos, coincide con lo observado por Mizrahi (1998) en otra especie de pitahaya (*H. Constaricensis*). También coincide con los resultados obtenidos en ensayos realizados en Israel con mallas de diferentes porcentajes de sombreo del 30- 60-90% en los que la relación raíz/tallo decreció con el aumento de la sombra (Raveh *et al.*, 1998). Todo ello sería coherente, por una parte, con las condiciones que este cultivo tiene en el lugar de origen y, por otra, con las recomendaciones que se le dan en cuanto a la implantación de algún sistema de sombreo.

La variedad “Thai” presentó un comportamiento diferente a la variedad “Purple”, en cuanto a la intensidad de brotación. En este caso, las plantas de la Fila 2 son las que mayor número de brotes presentaron en todo momento, alcanzando valores de 4,2 brotes/brazo. Le siguieron las de la Fila 1, la que mayor grado de sombreo presentaba por la disposición de los paneles solares, con 1,4 brotes y las de la Fila 4 (control) con 1,2 brotes, sin diferir entre ellas. Finalmente, fueron las plantas de la Fila 3 las que tuvieron significativamente un menor número con 0,5 brotes emitidos por brazo (Fig. 7)



**Fig. 7.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de brotación del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

Al estudiar el efecto que la orientación de los tallos de la planta, hacia el sol o hacia la sombra, dentro de la misma fila tenía en la intensidad de brotación, se observaron resultados erráticos. Así, en la Fila 1 el número de nuevos brotes fue significativamente mayor en los brazos orientados hacia la sombra (2), respecto de los orientados al sol (1) y el control (1,2) (Fig. 8A). Este comportamiento, sin embargo, no se repitió en el resto de filas tratadas. En la Fila 2 fueron las plantas orientadas al sol las que mayor número de brotes tuvieron (8), seguidas del control (1,2) y de las orientadas a la sombra que apenas alcanzaron 0,33 brotes (Fig. 8B). En la Fila 3, aunque también fue superior el número de brotes/tallo en los brazos orientados al sol (0,5) que en los orientados a la sombra que no brotaron, el control fue significativamente superior a ambos con 1,2 brotes/brazo (Fig. 8C).

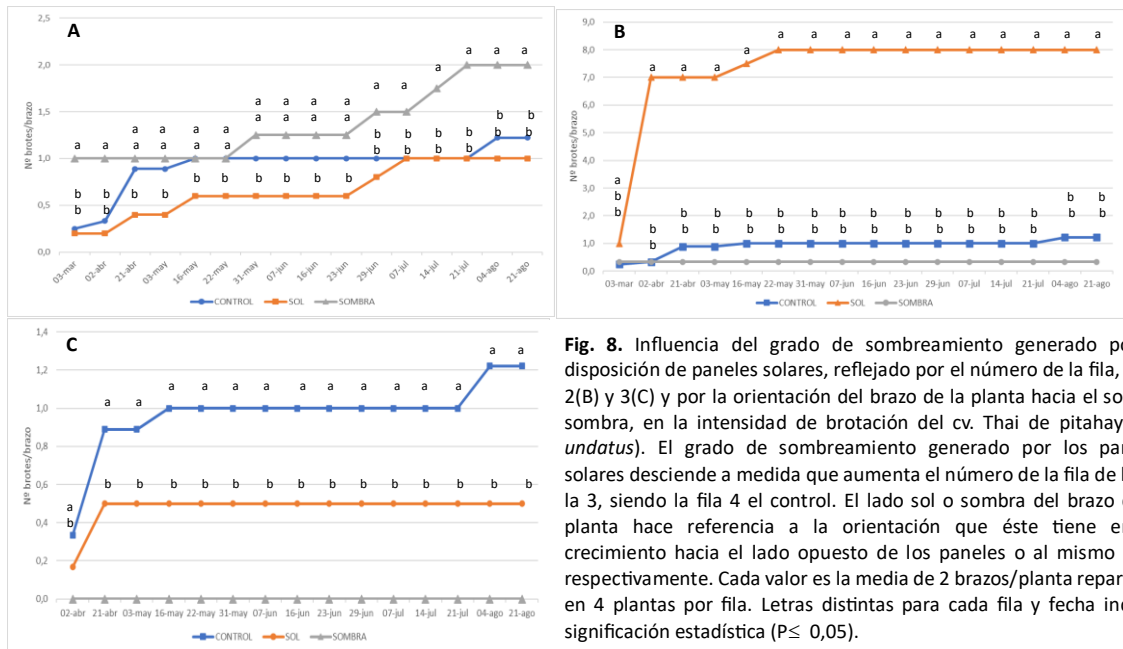
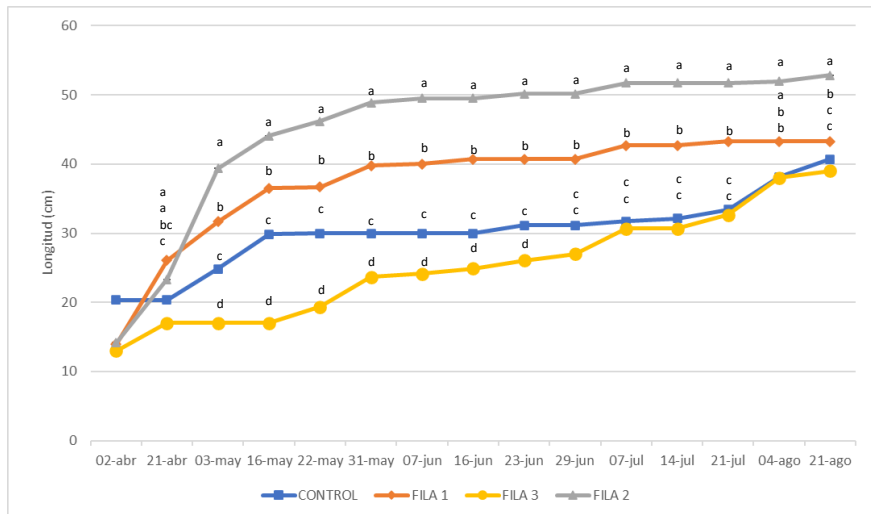


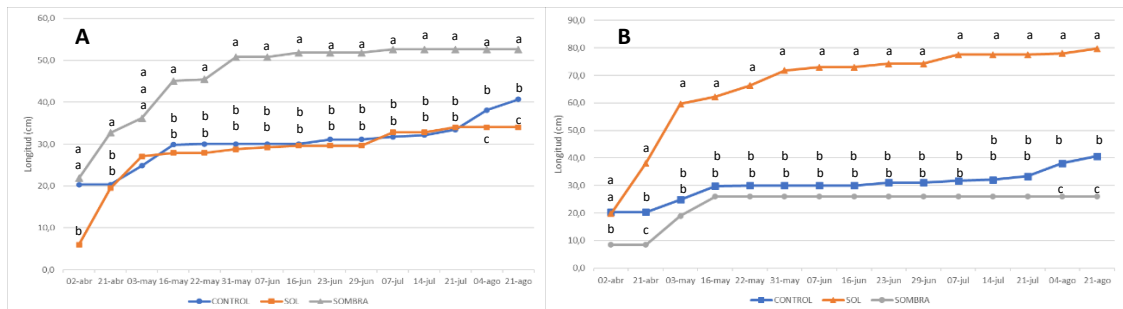
Fig. 8. Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de brotación del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares descende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

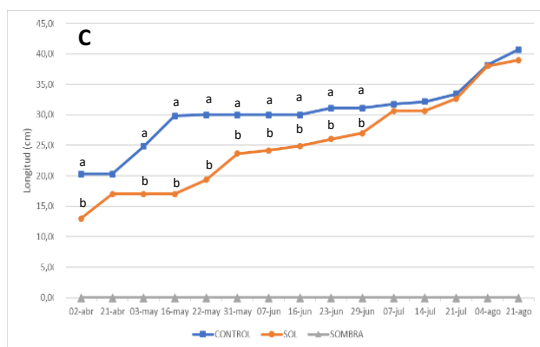
La longitud de los brotes, al igual que la intensidad de brotación, también se vio alterada por el sombreado generado por los paneles solares. En este caso, al igual que en la intensidad de brotación, la Fila 2 fue la que presentó los brotes de mayor longitud (53 cm), y con una velocidad de desarrollo que, desde prácticamente el inicio, ya fue superior (Fig. 9). Los brotes de las plantas más sombreadas, las situadas en la Fila 1, aunque crecieron más rápido que las de la Fila 3 y control, y fueron ligeramente más largos, no alcanzaron la significación estadística (Fig. 9). Algo parecido ocurrió en los brotes control y de la Fila 3, aunque los primeros empezaron creciendo más rápido, a partir del 7 de julio se igualaron y alcanzaron los 41 y 39 cm, respectivamente (Fig. 9).



**Fig. 9.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la longitud de los brotes del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 4 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

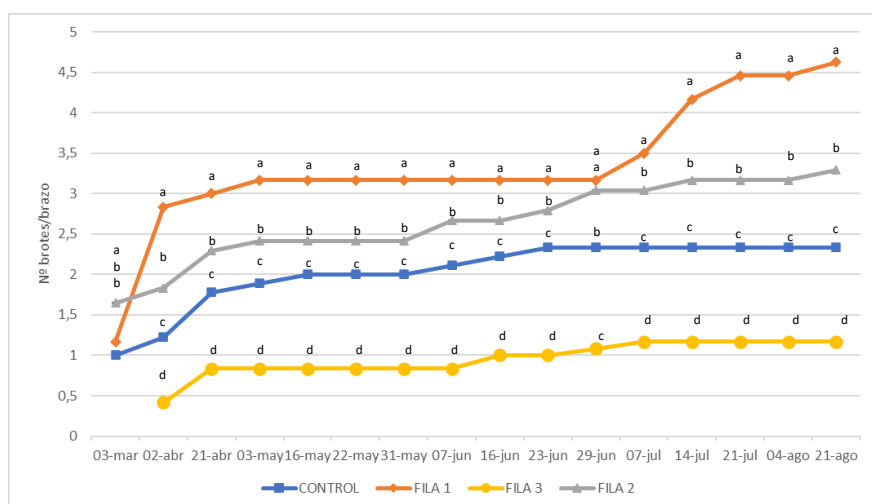
En el cv. Thai, los resultados obtenidos respecto a la longitud de los brotes en función de la orientación sol o sombra de los brazos dentro de las filas, también fueron erráticos. Así, en la Fila 1 los brotes situados a la sombra fueron los que más crecieron (51,2 cm), seguidos del control (41 cm) y muy de cerca de los orientados al sol (34 cm) (Fig. 10A). Sin embargo, en la Fila 2 y 3 los resultados fueron diferentes. Mientras en la Fila 2 los que más crecieron fueron los orientados al sol (80 cm), en la Fila 3 también fueron los orientados al sol, pero sin diferir con el control y con sólo 39 cm (Figs. 10B y C). Es de destacar, que, en ambas filas, los brotes orientados a la sombra, apenas crecieron. El hecho de que en esta variedad sean los brotes de las plantas ubicadas en la Fila 2, con un grado de sombreado intermedio, los que mayor longitud alcancen, podría deberse a un efecto de sensibilidad varietal, es decir, que esta variedad requiera menos sombra o, dicho de otra manera, más intensidad lumínica.





**Fig. 10.** Influencia del grado de sombreamiento generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la longitud de los brotes del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreamiento generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 4 brotes/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

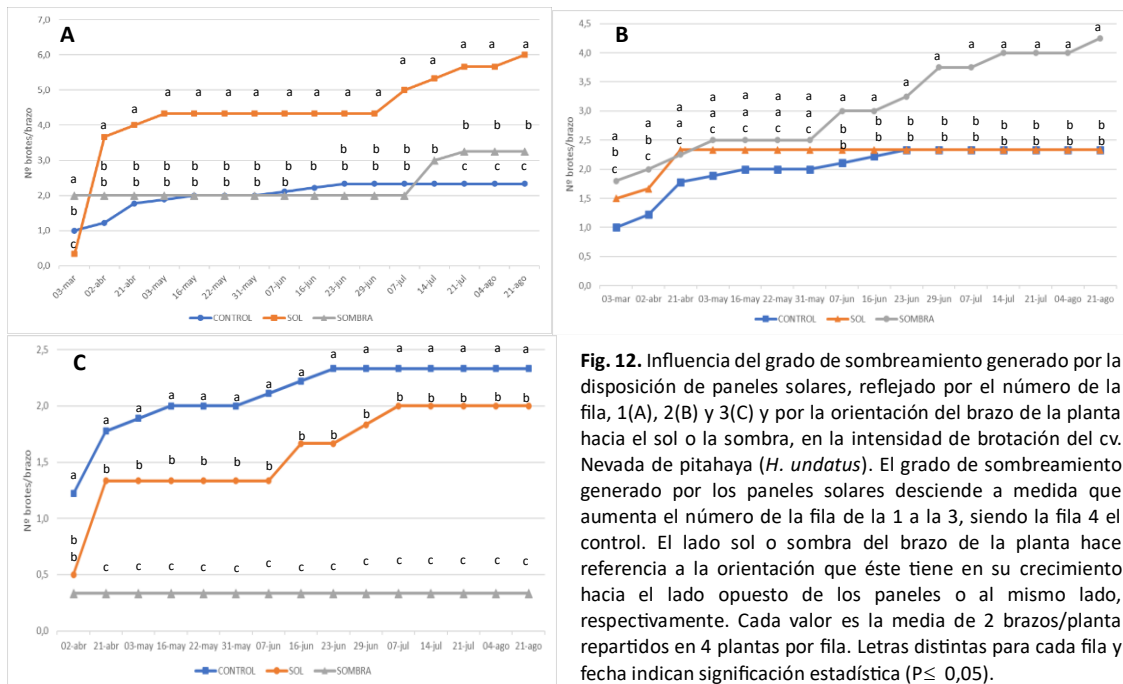
Finalmente, en el cv. Nevada, el número de brotes emitidos fue significativamente superior (4,7) en la Fila 1 o más sombreada, coincidiendo con el cv. Purple, seguido de la Fila 2 (3,3), del control (2,3) y, finalmente, de la Fila 3 con apenas 1,2 brotes/tallo (Fig. 11). Es de destacar el notable incremento en el número de brotes detectado a partir del 29 de junio en las plantas de la Fila 1 que, por el contrario, no se registró en el resto de filas (Fig. 11).



**Fig. 11.** Influencia del grado de sombreamiento generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de brotación del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreamiento desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

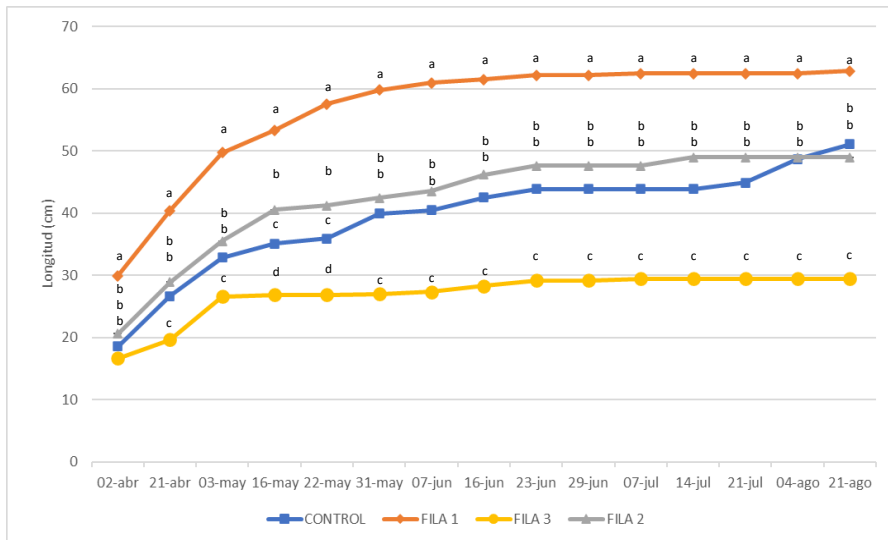
Al igual que en las variedades anteriores, al estudiar el efecto de la orientación del brazo en la fila, los resultados en la brotación fueron completamente erráticos. Sólo hay que ver, que mientras en la Fila 1 o más sombreada, el mayor número de brotes se observó en los brazos orientados al sol (6), en la Fila 2 o parcialmente sombreada fue en los orientados a la sombra (4,3), y en la Fila 3 o menos sombreada lo fue en el control con apenas 2,4 brotes/brazo (Fig. 12). Por otra parte, en la Fila 1 los brazos orientados a la sombra brotaron en mayor intensidad que en el control, con 3,2 y 2,4 brotes/brazo, respectivamente (Fig. 12A). En la Fila 2, sin embargo,

no se encontraron diferencias significativas en la intensidad de brotación, entre los brazos orientados al sol y el control que fue, en ambos casos, en promedio de 2,5 brotes/brazo (Fig. 12B). Finalmente, en la Fila 3, aunque el control fue el que más brotó (2,4 brotes/brazo), le siguieron muy de cerca los brazos orientados al sol (2 brotes/brazo), mientras que los orientados a la sombra apenas brotaron (Fig. 12C).



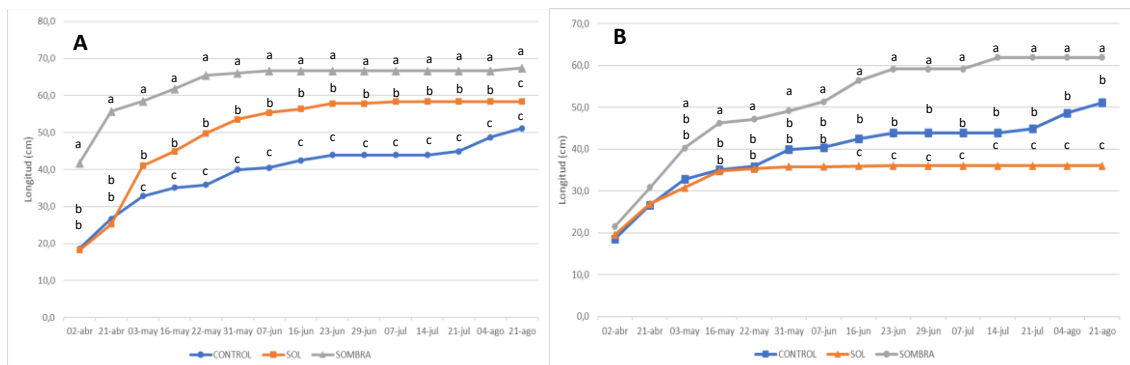
**Fig. 12.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de brotación del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 2 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

De modo similar a la intensidad de brotación, el mayor crecimiento de los brotes se obtuvo en las plantas de la Fila 1 o más sombreadas con alrededor de 62 cm. En segundo lugar, fueron los brotes de las plantas control las que más crecieron, con alrededor de 52 cm, seguidos muy de cerca por los de la Fila 2 (48 cm) y la Fila 3 (30 cm) (Fig. 13). Sin embargo, aunque en la longitud final de los brotes apenas hubo diferencias entre el control y la Fila 2, sí las hubo con respecto al control. También se observaron diferencias en el ritmo de crecimiento de éstos últimos, desde el inicio hasta finales de junio (23 de junio).

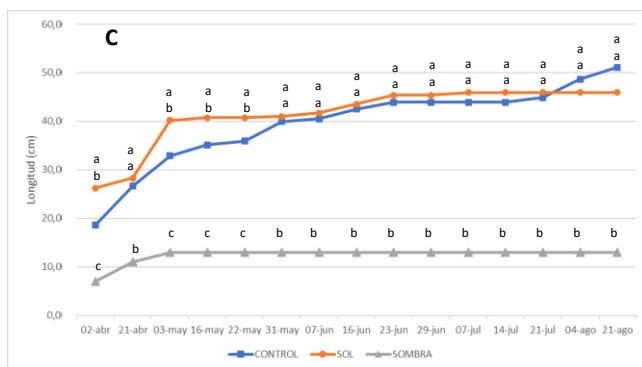


**Fig. 13.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la longitud de los brotes del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media de 4 brotes/planta repartidos en 4 plantas por fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

Al evaluar la influencia de la orientación del brazo en la planta, tanto en la Fila 1 como en la Fila 2, los brotes orientados hacia la sombra presentaron una pauta de mayor desarrollo con respecto a los orientados al sol y al control (Fig. 14A y B). Pero, así como en la Fila 1, fueron los orientados al sol los que, después de los de la sombra, crecieron más; en la Fila 2 fue el control. En la Fila 3, por el contrario, los brazos orientados a la sombra apenas crecieron, mientras los orientados al sol y el control lo hicieron de manera paralela, hasta alcanzar una longitud similar entre ellos, en torno a los 45 cm (Fig. 14C). Estos resultados coinciden con los observados en el cv. Purple, en los que además de crecer más los brotes orientados a la sombra en las Filas 1 y 2, esta longitud fue mayor en la fila más sombreada, 10 cm más de longitud en los brotes orientados a la sombra en la Fila 1 que en la Fila 2 (Figs. 14 A y B). En este sentido, los resultados obtenidos en esta variedad, también coincidirían con los observado por Mizrahi (1998), que establecían diferencias en cuanto a los requerimientos lumínicos, sometiendo a la especie *H. Polyrhizus* a tres niveles de sombreado.



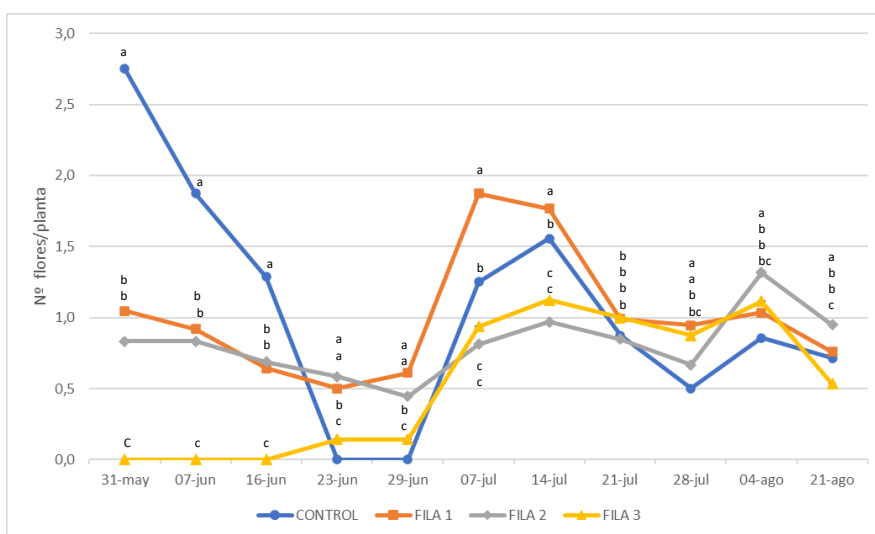




**Fig. 14.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la longitud de los brotes del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares descende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media de 4 brazos/planta repartidos en 4 plantas por fila Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

#### 4.1.2. Influencia del sistema agrovoltaico en la floración

La floración, al igual que en la brotación y desarrollo vegetativo, también se vio alterada por el grado de sombreado impuesto por la disposición de los paneles solares. Así, mientras en las plantas ubicadas en las Filas 1 y 2, así como en el control, se observaron flores el 31 de mayo, con valores de 1,1, 0,8 y 2,8 flores/planta, respectivamente, en las ubicadas en la Fila 3 no se observó ninguna flor hasta casi un mes después (23 junio). Sin embargo, mientras las plantas de las Filas 1 y 2 consiguieron florecer durante prácticamente todo el tiempo de estudio, alcanzando su pico máximo entre el 7-14 de julio, en el control no hubo flores durante, prácticamente una semana (23-29 junio), aunque aumentarían significativamente después en la misma línea que las anteriores (Fig. 15). También las plantas de la Fila 3 florecieron en esta época aunque con menor intensidad que las de la Fila 1 y el control. Una semana más tarde, mientras en las plantas de la Fila 1 y del control, el número de flores descendió ligeramente, en las de las Filas 2 y 3 se mantuvo prácticamente constante (Fig. 15). Finalmente se observó un nuevo repunte el 4 de agosto en todas las plantas, independientemente de su ubicación, aunque éste fue mayor en la Fila 2 (Fig. 15). Resulta interesante destacar que las plantas menos sombreadas, Fila 3 y control, son las que mostraron un periodo, más intenso en las primeras, en las que no se observaron flores (Fig. 15)

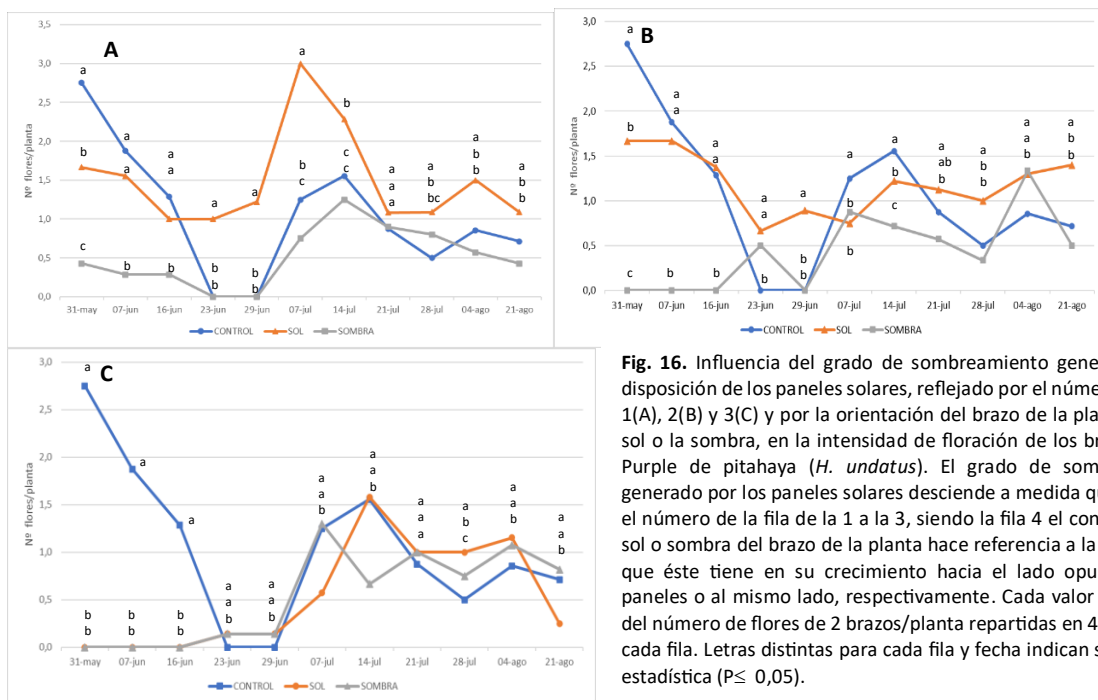


**Fig. 15.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de floración del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado descende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo

el control la fila 4. Cada valor es la media del número de flores de dos brazos/planta repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

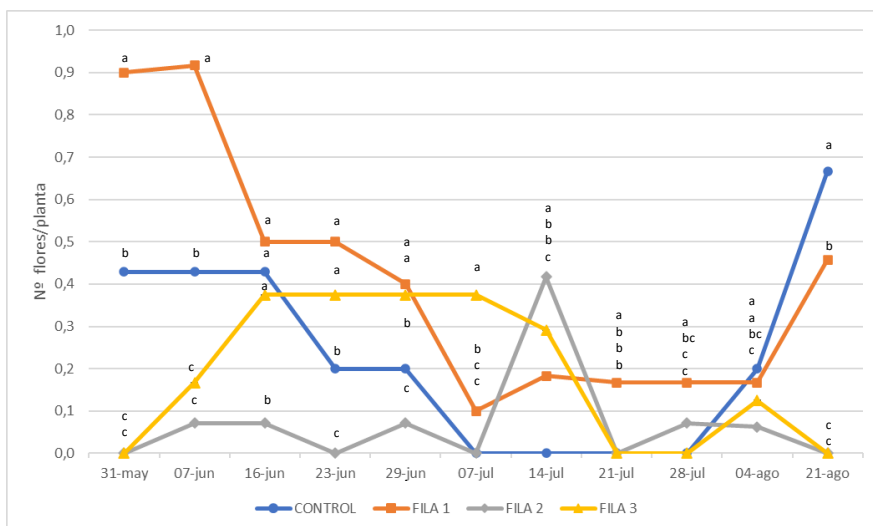
Al igual que ocurrió en la brotación, los resultados en la floración también fueron erráticos, cuando se evaluaron teniendo en cuenta la orientación del brazo hacia el sol o la sombra dentro de la misma fila. Así, mientras en la Fila 1 fueron los brazos orientados al sol los que significativamente más flores aportaron al pico de floración localizado a principios de julio, en la Fila 2 fue el control seguido de cerca de los brazos orientados al sol y en la Fila 3 apenas hubo diferencias entre los tres (Fig. 16). Es importante destacar que en la fila más sombreada (Fila 1), los brazos orientados a la sombra florecieron, aunque escasamente, durante el intervalo comprendido entre finales de mayo y finales de junio. Si bien en la Fila 3 no hubo flores durante todo este tiempo, independientemente de la orientación de los brazos (Fig. 16 C). De manera general, el grado de flores desarrolladas a la sombra en todas las filas, fue inferior, a las desarrolladas en la parte soleada (Fig. 16).

Estos resultados coincidirían con la hipótesis de Nobel y de la Barrea (2004), que apunta que en condiciones de sombreado elevado el número de flores se reduce y el de abortos florales aumenta. Esto a su vez lo relaciona con el flujo de fotosimilados a los tejidos vegetativos en lugar de los reproductivos.



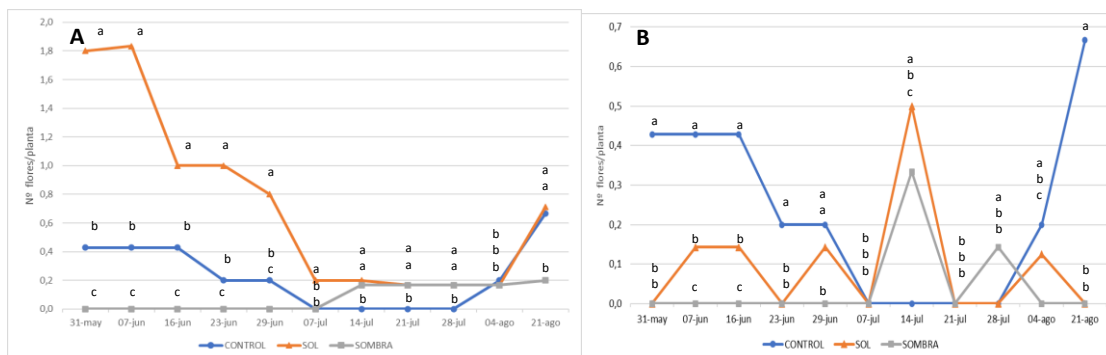
**Fig. 16.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de floración de los brotes del cv. Purple de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media del número de flores de 2 brazos/planta repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

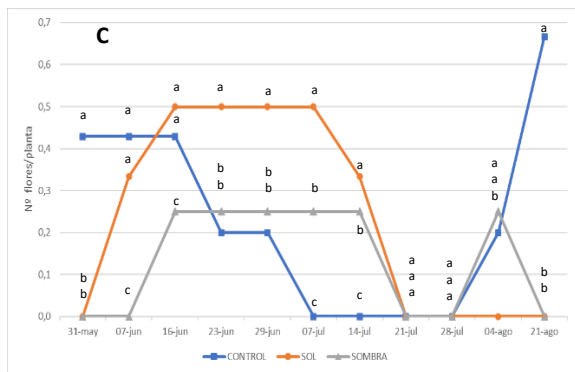
En el cv. Thai, las plantas de la Fila 1, es decir, la fila más sombreada, fueron capaces de florecer durante todo el periodo. Es más, al iniciarse el periodo reproductivo, fueron las que mayor número de flores emitieron con 0,92 flores/brazo, descendiendo paulatinamente después, hasta estabilizarse prácticamente a principios de julio y repuntar a finales de agosto (Fig.17) En las filas 2 y 3, los botones florales tardaron más tiempo en emerger que en la Fila 1 y el control. (Fig. 17)



**Fig. 17.** Influencia del grado de sombreamiento generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de floración del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreamiento descende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media del número de flores de 2 brazos/planta repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

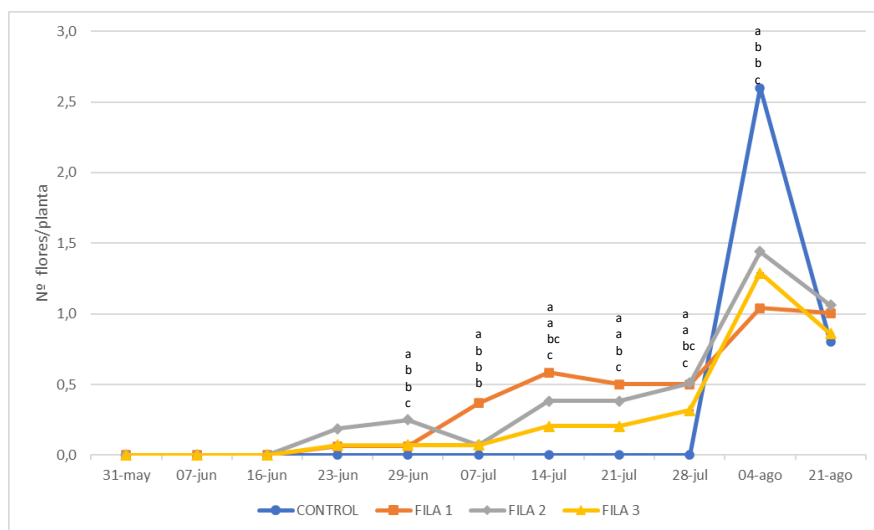
Al evaluar la influencia de la orientación del brazo dentro de la fila, al igual que se observó para el cv. Purple, en términos generales la floración fue mayor en el lado soleado que en el sombreado, para todas las filas y, por tanto, para todos los niveles de sombreado (Fig. 18). Así, en la Fila 1, los brazos con mayor número de flores durante la primera ola de floración, fueron los de la zona soleada, difiriendo significativamente con los de la sombra y el control (Fig. 18A). Es más, en los brazos de la sombra, no se detectaron órganos reproductivos hasta la primera quincena de julio, aunque escasamente. En la Fila 2, sin embargo, el pico máximo de flores se presentó a mediados de julio, siendo mayor en los brazos orientados al sol, que también fueron emitiendo flores previamente, pero sin llegar a ser de esa magnitud (Fig. 18B). Finalmente, en la Fila 3 los brazos orientados a la sombra emitieron flores a principios de junio, a diferencia de las Filas 1 y 2 que lo hicieron un mes más tarde (Fig. 18C). Cabe mencionar, que independientemente de la Fila, el mayor número de flores se obtuvo en los brazos orientados al sol, aunque con diferencias cuantitativas, ya que el número de flores por brazo, descendía conforme lo hacía el grado de sombreo (Fig. 18).





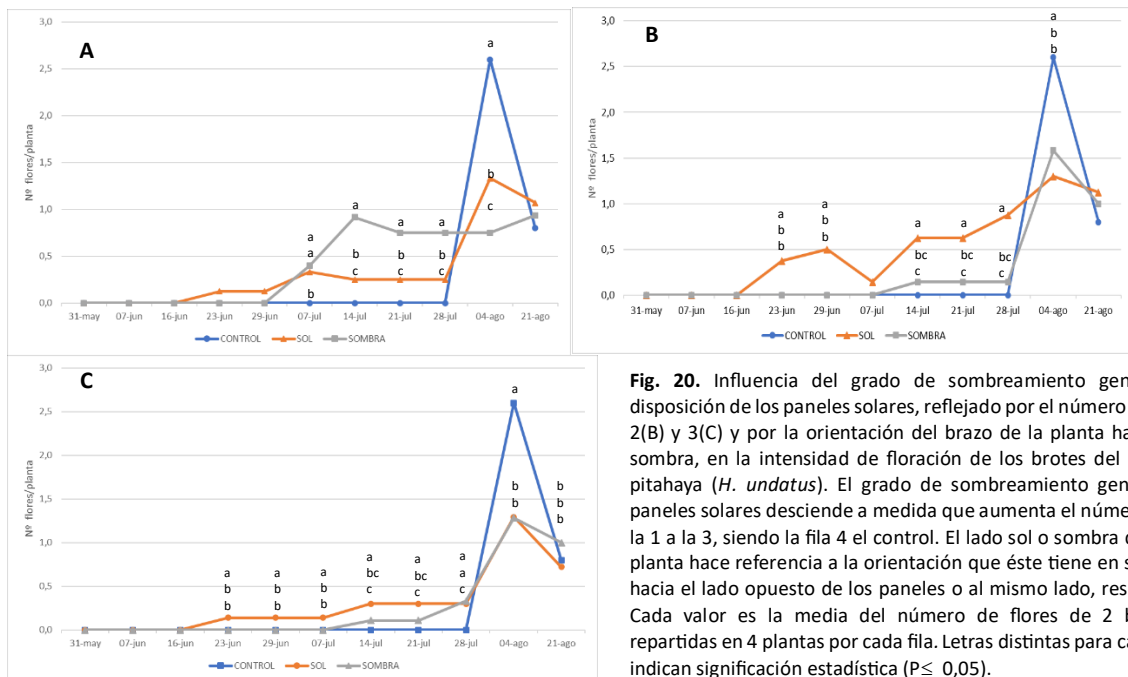
**Fig. 18.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de floración de los brotes del cv. Thai de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media del número de flores de 2 brazos/plantas repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

El cv. Nevada fue el más tardío, ya que el pico máximo de floración apareció a principios de agosto. Si bien la presencia de paneles solares y, con ello, el sombreado de las plantas adelantó la presencia de flores a finales de junio y en mayor medida a principios-medios de julio (Fig. 19). Este efecto que se observó en las 3 filas y, por tanto, en diferentes grados de sombreado fue más pronunciado en la fila más sombreada (Fila 1) que siempre mostró más flores, excepto a finales de junio que fue en la Fila 2 (Fig. 19). Sin embargo, a principios de agosto, en plena ola de floración, las plantas de la Fila 2 son las que mayor número de flores/brazo registraron (1,4) seguidas de cerca por la Fila 3 (1,2) y por la Fila 1 (1,1). El control presentó significativamente más flores (2,6) (Fig. 19).



**Fig. 19.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de paneles solares, reflejado por el número de la fila, en la intensidad de floración del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado desciende a medida que aumenta el número de la fila, de la 1 a la 3, siendo el control la fila 4. Cada valor es la media del número de flores de 2 brazos/plantas repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

Al evaluar la influencia de la orientación del brazo, se observó, que, en esta variedad, independientemente de la Fila, los brazos orientados al sol eran capaces de emitir antes las flores que los de la zona de sombra y el control (Fig. 20). El comportamiento de las plantas situadas en las Filas 2 y 3 fue muy similar en cuanto a la floración, aunque en las primeras la intensidad de floración fue superior (Figs. 20B y C). En las plantas de la Fila 1, por el contrario, el número de flores en los brazos orientados a la sombra fue significativamente superior que los orientados al sol hasta el 4 de agosto que se invirtió (Fig. 20A). En cualquier caso, resulta interesante destacar que la presencia de paneles solares y, por tanto, del aporte de sombra en diferentes niveles, consiguió anticipar la aparición de flores en esta variedad tardía.

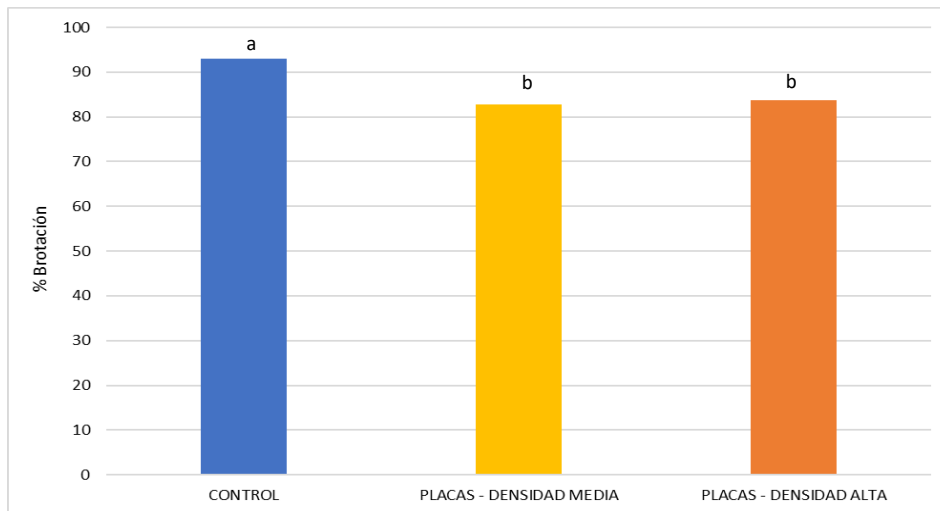


**Fig. 20.** Influencia del grado de sombreado generado por la disposición de los paneles solares, reflejado por el número de la fila, 1(A), 2(B) y 3(C) y por la orientación del brazo de la planta hacia el sol o la sombra, en la intensidad de floración de los brotes del cv. Nevada de pitahaya (*H. undatus*). El grado de sombreado generado por los paneles solares desciende a medida que aumenta el número de la fila de la 1 a la 3, siendo la fila 4 el control. El lado sol o sombra del brazo de la planta hace referencia a la orientación que éste tiene en su crecimiento hacia el lado opuesto de los paneles o al mismo lado, respectivamente. Cada valor es la media del número de flores de 2 brazos/plantas repartidas en 4 plantas por cada fila. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

## 4.2. Influencia de la instalación de un sistema agrivoltaico en el comportamiento agronómico de la higuera

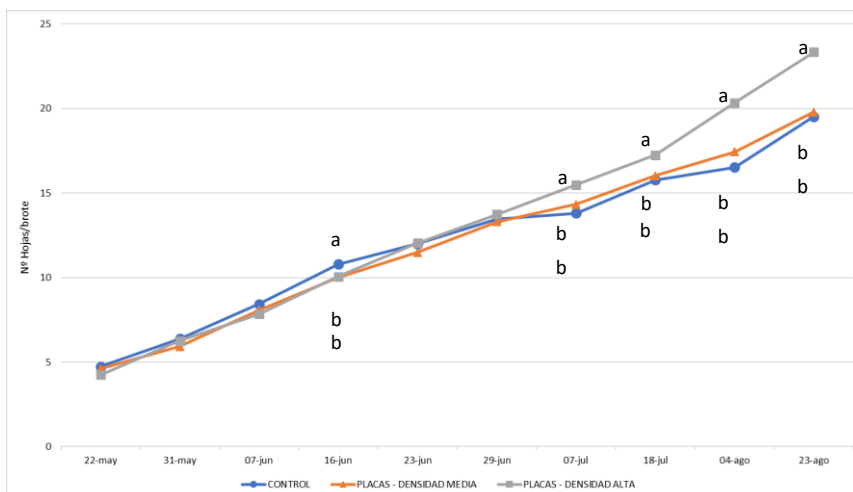
### 4.2.1. Influencia del grado de sombreado sobre el desarrollo vegetativo

El sombreado provocado por las placas solares redujo significativamente el porcentaje de yemas brotadas. Así, mientras en el control el porcentaje de brotación alcanzó el 93%, en las filas de sombreado medio y de densidad alta fue del 83% y el 84%, respectivamente, sin que esta diferencia alcanzara la significación estadística.



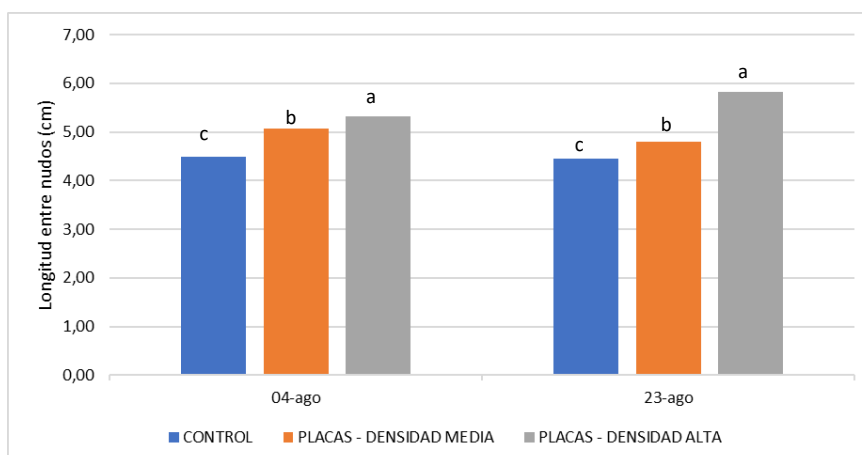
**Fig. 21.-** Influencia del sombreado provocado por las placas solares sobre el porcentaje de brotación de la higuera cultivada en invernadero. La densidad media y alta hace referencia a las configuraciones de las placas en el techo del invernadero, que generan dos niveles de sombreado, medio y alto. Cada valor es la media de 3 bloques de 6 plantas cada uno. Letras distintas para cada fila indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ). El registro de los datos se realizó el 16/05/2023.

Durante el primer mes de cultivo (37 días) el número de hojas por brote fue el mismo para todos los tratamientos, pero, transcurrido éste las plantas menos sombreadas retrasaron significativamente la formación de hojas. A los 45 días de cultivo (7 julio) las plantas con alta densidad de placas habían desarrollado 16 hojas, las de densidad de sombreado medio 14 y las control 14, sin que entre estas últimas se alcanzara la significación estadística (Fig. 22). Esta diferencia fue aumentando con el tiempo y a los 3 meses de cultivo (23 de agosto), mientras las plantas sin sombrear y con sombreado medio habían desarrollado 19,8 y 19,5 hojas por planta, respectivamente, las plantas bajo densidad máxima de placas tenían 23,3 hojas (Fig. 22).



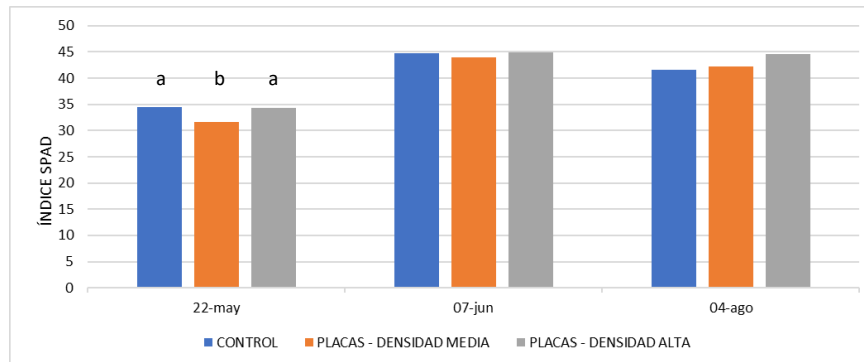
**Fig. 22.-** Influencia del sombreado provocado por las placas solares sobre el número de hojas por brote en plantas de higuera cultivada en invernadero. La densidad media y alta hace referencia a las configuraciones de las placas en el techo del invernadero, que generan dos niveles de sombreado, medio y alto. Cada valor es la media de 3 bloques y 4 plantas por bloque. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

La longitud de los entrenudos también aumentó con el sombreado. A los dos meses y medio de cultivo (4 de agosto) las plantas sin sombreadar tenían los entrenudos significativamente más cortos (4,5 cm) que las sombreadas con una densidad media de placas solares (5,1 cm) y estas, a su vez, que las sombreadas con alta densidad de placas (5,3 cm) (Fig. 23). Veinte días más tarde, los entrenudos apenas habían crecido, si bien en las plantas sombreadas eran significativamente más largos que en las sombreadas en densidad media y las sin sombreadar (Fig. 23).



**Fig. 23.** Influencia del sombreado provocado por las placas solares sobre la longitud de los entrenudos en plantas de higuera cultivada en invernadero. La densidad media y alta hace referencia a las configuraciones de las placas en el techo del invernadero, que generan dos niveles de sombreado, medio y alto. Cada valor es la media de 3 bloques y 4 plantas por bloque. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

Los valores SPAD son un indicador indirecto del contenido en clorofilas de las hojas. El sombreado apenas afectó este valor, que, si bien inicialmente fue significativamente superior en las filas con mayor densidad de sombreado y en el control, con el tiempo las diferencias desaparecieron y a los 45 d de cultivo sus valores eran mayores pero idénticos entre los tratamientos (Fig. 24). Dos meses más tarde (4 agosto) los valores SPAD permanecían constantes y sin diferencias significativas entre ellos.

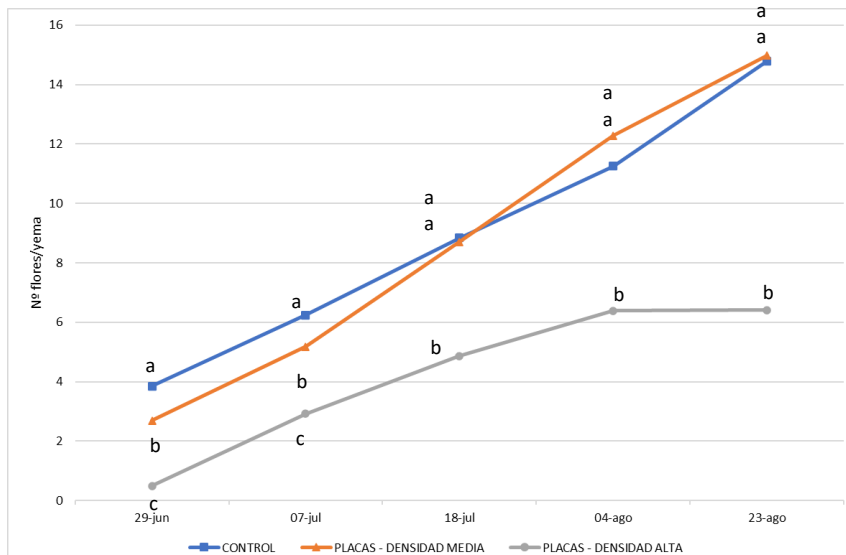


**Fig. 24.** Influencia del sombreado provocado por las placas solares en el valor SPAD de las hojas de plantas de higuera cultivada en invernadero. La densidad media y alta hace referencia a las configuraciones de las placas en el techo del invernadero, que generan dos niveles de sombreado, medio y alto. Cada valor es la media de 3 bloques y 5 hojas por bloque. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ ).

#### 4.2.2. Influencia del grado de sombreado sobre el desarrollo reproductivo

El desarrollo reproductivo se inició más intensamente en las plantas sin sombreado (4 flores/yema) que en las sombreadas con intensidad media (2,4 flores/yema) y en éstas más que en las sombreadas en alta densidad (0,8 flores/yema) (Fig. 23). Con el tiempo el número de flores por yema aumentó en todos los tratamientos, llegando a igualarse a finales de agosto el número en las plantas control y sometidas a densidad de sombreado medio (14,5 flores/yema), que difirieron significativamente del de las plantas cultivadas bajo una densidad de placas solares alta (6,4 flores/yema) (Fig. 23).





**Fig. 25.-** Influencia del sombreado provocado por las placas solares sobre el número de flores por yema en plantas de higuera cultivada en invernadero. La densidad media y alta hace referencia a las configuraciones de las placas en el techo del invernadero, que generan dos niveles de sombreado, medio y alto. Cada valor es la media de 3 bloques y 4 plantas por bloque. Letras distintas para cada fila y fecha indican significación estadística ( $P \leq 0,05$ )

Las plantas requieren de actividad fotosintética para garantizar su crecimiento. Sin embargo, en algunas etapas del desarrollo, como tras la germinación de la semilla, la fotosíntesis no puede llevar a cabo este papel porque las clorofilas todavía no están presentes en la planta. Requieren, entonces, de un proceso de desetiología, esto es, del paso del desarrollo a la oscuridad (bajo el suelo) a la luz. La respuesta diferencial que presentan frente a la iluminación se denomina fotomorfogénesis y entre los pigmentos que pueden promoverla están los que pueden absorber la luz del espectro azul y del rojo. Entre ellos, el fitocromo, una proteína-pigmento que absorbe la luz del rojo y del rojo lejano, adquiere importancia decisiva en el proceso. Este fotorreceptor está en forma de absorción de luz roja en las plantas etioladas y se transforma en la forma que absorbe el rojo lejano, que es, a su vez, la forma fisiológicamente activa del fitocromo. Ambas formas son reversibles.

Un aspecto importante del fitocromo es que permite detectar la sombra que producen otras plantas u objetos, como mallas, plásticos, ... y placas solares, como es el caso de nuestro estudio. La respuesta de las plantas al sombreado es el aumento de la longitud de sus tallos, como ocurre en la higuera. Y en nuestro caso este aumento no significa un mero adelanto del crecimiento sino un aumento total de éste, ya que es consecuencia de la mayor longitud de los entrenudos.

En nuestra situación geográfica la intensidad luminosa en un día soleado es de, aproximadamente, 2000  $\mu\text{moles s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , siendo el punto de saturación luminosa para los frutales alrededor de los 800  $\mu\text{moles s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , lo que representa sólo el 40% de la radiación incidente. Este exceso de luz puede causar estrés en la planta, provocando pequeños cambios que repercuten negativamente en su desarrollo normal (Agustí et al., 2022). Este hecho explicaría la relación lineal existente entre el grado de sombreado y el mayor desarrollo vegetativo observado en la higuera, que coinciden con los observados por Tadayon y Houssini (2022). A medida que la sombra aumenta, la mayor proporción de radiación del rojo lejano induce un mayor crecimiento del tallo, pero en las denominadas plantas de sombra esta "reacción" no se da, de modo que existe una relación entre el crecimiento controlado por el fitocromo y el hábitat de las especies (Briggs et al., 1984).

Por otra parte, este mayor desarrollo vegetativo explica el mayor número de hojas por brote. Sin embargo, ello es sólo un adelanto en la aparición de éstas, ya que el número de nudos por tallo no fue alterado por nuestras condiciones de cultivo (datos no presentados).

Es de destacar el menor número de flores por yema en las plantas más sombreadas. Esta especie es de día neutro y la diferenciación floral de sus yemas tiene lugar durante la elongación de los brotes (Crane, 1986). Dado que las plantas más sombreadas desarrollan tallos más largos y tienen mayor número de hojas, su menor número de flores debe ser consecuencia de un efecto competitivo entre el desarrollo vegetativo y reproductivo, como se ha señalado para otras especies (Agustí et al., 2022; Reig et al., 2006). Este aspecto, no obstante, debe ser estudiado con mayor profundidad

## 5. Conclusión

A la vista de estos resultados, las conclusiones de este trabajo son:

1. La brotación de la pitahaya, al igual que el desarrollo de los brotes, depende del grado de sombra que percibe la planta, aumentando generalmente a medida que éste es más intenso. La implantación del sistema agrovoltaico contribuye a esto.
2. La orientación del brazo de la planta respecto de la fila mostró resultados erráticos en las 3 variedades estudiadas, en cuanto a la capacidad de brotar y del crecimiento de los brotes.
3. Las olas de floración, en general, no se vieron modificadas temporalmente por la implantación de los paneles y, con ello, del grado de sombra aportado, pero sí el número de flores que fue mayor en la fila más sombreada. Sólo en el cv. Thai se registró a mediados de julio un pico de floración ausente en el control.
4. En el cv. Nevada, el sombreado aportado por los paneles solares consiguió anticipar la aparición de flores.
5. En la higuera, la mayor densidad de placas provocó un mayor sombreado, con un aumento del crecimiento vegetativo, que vio, no obstante, reducida su floración, en comparación con las plantas menos sombreadas (placas al tresbolillo) y sin sombrear (sin placas solares). La influencia de todo ello sobre la producción y época de recolección está por determinar.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agustí Fonfría, M. (2022). *Fruticultura* 3ª ed. Ediciones Mundi-Prensa.
- Reig, C., González-Rossia, D., Juan, M., Agustí, M. 2006. Effects of fruit load on flower bud initiation and development in peach. *J. Hort. Sci. Biotechnol.*, 81: 1079–1085
- Goetzberger, A. & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1, 55–69.
- Dupraz, C. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renew Energy* 36, 2725–2732.
- Cossu, M. (2014). Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Appl Energy* 133, 89–100.
- Kumpanalaisatit, M., Setthapun, W., Sintuya, H., Pattiya, A. & Jansri, S. N. (2022). Current status of agrivoltaic systems and their benefits to energy, food, environment, economy, and society. *Sustain Prod Consum* 33, 952–963.
- Chu, Y. C. & Chang, J. C. (2020). Regulation of floral bud development and emergence by ambient temperature under a long-day photoperiod in white-fleshed pitaya (*Hylocereus undatus*). *Scientia Horticulturae* 271.
- Le Bellec, F. & Vaillant, F. (2011). Pitahaya (pitaya) (*Hylocereus* spp.). *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* 4, 247–273e.
- Weiss, J., Nerd, A. & Mizrahi, Y. (1994). Flowering behavior and pollination requirements in climbing cacti with fruit crop potential. *HortScience* 29, 1487–1492.
- Nobel, P. S. & Hartsock, T. L. (1978). Resistance Analysis of Nocturnal Carbon Dioxide Uptake by a Crassulacean Acid Metabolism Succulent, *Agave deserti*. *Plant Physiology* 61, 510–514.
- Tomaz de Oliveira, M. M. T. (2021). Shade improves growth, photosynthetic performance, production and postharvest quality in red pitahaya (*Hylocereus costaricensis*). *Scientia Horticulturae* 286.
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P. & Lo Bianco, R. (2016). Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environ Exp Bot* 122, 158–167.
- Tomaz de Oliveira, M. M., Lu, S., Zurgil, U., Raveh, E. & Tel-Zur, N. (2021). Grafting in *Hylocereus* (Cactaceae) as a tool for strengthening tolerance to high temperature stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 160, 94–105.

- Jiang, Y. L. (2020). Seasonal response of night-breaking on floral bud formation in red pitaya (*Hylocereus* sp.) in a noninductive period. *Scientia Horticulturae* 270.
- Briggs, W.R., Mandoli, D.F., Shinkle, J.R., Kaufman, L.S., Watson, J.C., Thompson, W.F. 1984. Phytochrome regulation of plant development at the whole plant, physiological, and molecular levels. En: *Sensory perception and transduction in aneuronal organisms*. G. Colombetti, F. Lenci., P.-S. Song (Eds.). Plenum, Nueva York. pp 265-280.
- Crane, J.C. 1986. Fig. En: *Handbook of Fruit Set and Development*. S.P. Monselise (Ed.). CRC Press Boca Raton, FL, EEUU. pp 153–165.
- Ferrara, G., Boselli, M., Palasciano, M., & Mazzeo, A. (2023). Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.). *Scientia Horticulturae*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111595>
- García-Sánchez, F., Simón, I., Lidón, V., Manera, F. J., Simón-Grao, S., Pérez-Pérez, J. G., & Gimeno, V. (2015). Shade screen increases the vegetative growth but not the production in “Fino 49” lemon trees grafted on *Citrus macrophylla* and *Citrus aurantium* L. *Scientia Horticulturae*, 194, 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.005>
- Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., & Vercambre, G. (2022). Shading apple trees with an agrivoltaic system: Impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. *Scientia Horticulturae*, 306, 111434. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111434>
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
- Nerd, A., Sitrit, Y., Kaushik, R. A., & Mizrahi, Y. (2002). High summer temperatures inhibit flowering in vine pitaya crops (*Hylocereus* spp.). *Scientia Horticulturae*, 96(1–4), 343–350. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(02\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00093-6)
- Raveh, E., M. Gersany and P.S. Nobel (1995) CO<sub>2</sub> uptake and fluorescence responses for a shade-tolerant cactus *Hylocereus undatus* under current and doubled CO<sub>2</sub>. *Physiologia Plantarum* 93:505-511
- Mizrahi, Y., & Nerd, A. (1999). *Climbing and Columnar Cacti : New Arid Land Fruit Crops*
- Mizrahi, Y., Raveh, E., Nerd, A., & Ben-Asher, J. (2007). *New Fruit Crops With High Water Use Efficiency*.
- Marrou, H., Dupraz, C., Dufour, L., & Augier, A. (2011). Growing crops under photovoltaic panels: a first in situ assessment of agrivoltaic systems

Nobel, P. S., & Barrera, E. (2004). CO<sub>2</sub> uptake by the cultivated hemiepiphytic cactus, *Hylocereus undatus*. *Annals of Applied Biology : an International Journal of the AAB.*, 144(1), 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2004.tb00310.x>

Raveh, E., Nerd, A., & Mizrahi, Y. (1998). Responses of two hemiepiphytic fruit crop cacti to different degrees of shade. *Scientia Horticulturae*, 73(2–3), 151–164. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(97\)00134-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(97)00134-9)

FAOSTAT. (s/f). Fao.org. Recuperado el 13 de septiembre de 2023, de <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>