



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA**

**DISEÑO DE HUERTOS
AGROVOLTAICOS COMUNITARIOS
PARA LOCALIDADES AISLADAS EN
REGIONES ÁRIDAS**

Tesis

Que para obtener el título de:

**INGENIERO EN ENERGÍAS
RENOVABLES**

Presentan

Carmen Samantha Araiza González

Karla Vanessa Reyna Jiménez

Hermosillo, Sonora

Agosto 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 11 de agosto de 2023.

DR. PAUL ZAVALA RIVERA
JEFE DEL DEPARTAMENTO
INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional **“DISEÑO DE HUERTOS AGROVOLTAICOS COMUNITARIOS PARA LOCALIDADES AISLADAS EN REGIONES ÁRIDAS”**, presentada por:

CARMEN SAMANTHA ARAIZA GONZÁLEZ
KARLA VANESSA REYNA JIMÉNEZ

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

11/08/2023

Fecha



DR. RODOLFO PEÓN ANAYA

11/08/2023



DR. IRVING OSÍRIS HERNÁNDEZ LÓPEZ

11/08/2023



DR. RAFAEL ENRIQUE CABANILLAS LÓPEZ

11/08/2023



DR. ARMANDO PIÑA ORTIZ

DEDICATORIA

Con cariño para Martha Elba y Angélica.

Carmen Samantha Araiza González

Para mi Familia.

Karla Vanessa Reyna Jiménez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, por las oportunidades para mi crecimiento académico brindadas durante estos 4 años y por la prestación de sus instalaciones para el desarrollo de este trabajo.

A CONAHCYT, por haber financiado el proyecto PRONACE 319483 “Seguridad energética, hídrica y alimentaria para pueblos originarios en zonas costeras del Norte de México”, gracias al cual surgió el tema de tesis aquí presentado. A todo el equipo que colabora en el proyecto, por su apoyo incondicional y que fue indispensable para que este trabajo se realizara.

A la Nación Comcaac, por permitirnos entrar a sus tierras y darnos la oportunidad de conocer más sobre su cultura y forma de vida.

A mis tutores de tesis, Dr. Rodolfo Peón y Dr. Rafael Cabanillas, los cuales siempre estuvieron dispuestos a darnos de su tiempo para ayudarnos a resolver las dudas que iban surgiendo, por siempre impulsarnos a ser mejores seres humanos y por enseñarnos que los sueños se cumplen.

A mi compañera de tesis y de toda la carrera, Karla Vanessa, por tu paciencia y comprensión, por enseñarme a trabajar en equipo. Agradezco tu valioso apoyo a lo largo de esta aventura.

Y a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa: Martha Elba, Angélica Ponce, Andrea Ponce, Paulina Durazo, Pablo Durazo, Horacio Araiza. Les quiero bastante.

Carmen Samantha Araiza González

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle al Dr. Rodolfo Peón Anaya, por su fe en nosotras, apoyo incondicional y otorgarnos las herramientas necesarias para ser mejores ingenieras. Gracias por motivarnos a siempre dar un esfuerzo extra.

Asimismo, me gustaría agradecer primeramente a mi compañera de tesis, Samantha, sin su dedicación, compañía y apoyo esta tesis no habría sido posible. No puedo imaginar otra persona como colaboradora e incluso enseñándome a ser más decidida y tener más confianza en mí misma.

Al Dr. Rafael Cabanillas, le quiero agradecer por todas las oportunidades y experiencias que nos brindó, sé que tanto ahora como en el futuro todas sus enseñanzas se verán reflejadas en nuestro trabajo.

A mi familia me gustaría agradecerles por siempre motivarme a dar todo de mí en cualquier ámbito, pero sobre todo en el académico. Sé el sacrificio que han hecho para priorizar mi educación. Esta tesis es para ustedes.

A mis amigas Carolina, Claudia y Kassandra, por ser mis eternas compañeras y mis más grandes animadoras. Su apoyo ha sido el cimiento para esta tesis, las quiero mucho.

A Alyson Jara, a quien quiero agradecerle por su amistad y todas las horas que me escuchó hablar con emoción de este proyecto. También por sus amplios conocimientos en temas eléctricos que muy generosamente compartió conmigo.

A mis compañeros de la universidad, Erick, Emiliano, Elizabeth y Paola por haberme acompañado durante estos años y ser la razón de haber pasado tan buenos momentos en esta carrera.

Últimamente, me gustaría agradecerle a todas las personas e instituciones gubernamentales y privadas que fueron tan generosas de proveernos toda la información necesaria para poder elaborar los diseños que se verán en esta tesis.

Karla Vanessa Reyna Jiménez

ÍNDICE DE CONTENIDO

VOTOS APROBATORIOS DEL JURADO	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
NOMENCLATURA	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos	7
1.5. Metodología	7
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	9
2.1. Estado del arte de la tecnología Agrovoltaica	9
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE HUERTOS AGROVOLTAICOS COMUNITARIOS	14
3.1. Descripción de los sistemas FV	14
3.1.1. Parque FV de Punta Chueca	14
3.1.2. Sistema FV de El Desemboque	16
3.2. Dimensionamiento de sistemas FV	18
3.2.1. Estimación de consumo de energía	19
3.2.1.1. Consumo de Planta Desalinizadora de Punta Chueca	19
3.2.1.2. Consumo de energía del Pozo de El Desemboque	21
3.2.2. Cálculo de capacidad FV requerida	23

3.2.2.1. Dimensionamiento de arreglo FV para la planta desalinizadora.....	24
3.2.2.2. Dimensionamiento de arreglo FV para pozo de El Desemboque.....	27
3.3. Conversión de sistemas FV a sistemas AV	28
3.3.1. Estudio de sombreado en 2D.....	30
3.3.2. Estudio de sombreado en 3D.....	37
3.4. Selección del cultivo de estudio	39
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO DE LOS HUERTOS AV COMUNITARIOS	40
4.1. Producción de alimento.....	40
4.1.1. Producción de alimento en modo industrial.....	41
4.1.2. Producción de alimento en modo silvestre.....	42
4.2. Consumo de agua	43
4.3. Producción de energía	43
4.4. Retorno de inversión simple.....	45
4.5. Discusión de resultados.....	47
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
5.1. Conclusiones.....	48
5.2. Recomendaciones.....	51
BIBLIOGRAFÍA.....	52
Ficha Técnica de Planta Desalinizadora de Punta Chueca.....	ANEXO A
Artículo presentado en la XLVI Semana Nacional de Energía Solar	ANEXO B

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los asentamientos de la Nación Comcaac (Luque-Agraz et al., 2016).....	4
Figura 2. (a) Planta desalinizadora de Punta Chueca, Sonora (b) Pozo de agua dulce en El Desemboque, Sonora.....	5
Figura 3. Propuesta de sistema AV de (Goetzberger y Zastrow, 1982).....	10
Figura 4. Diferentes tipologías de sistemas AV (Toledo y Scognamiglio, 2021).....	12
Figura 5. Parque FV de 386 kWp en Punta Chueca, Sonora.....	15
Figura 6. Diagrama eléctrico unifilar del Parque FV de Punta Chueca.....	15
Figura 7. Croquis del Parque FV instalado en Punta Chueca, Sonora.....	16
Figura 8. Sistema FV de 17.5 kWp en pozo de El Desemboque, Sonora.....	17
Figura 9. Diagrama eléctrico unifilar de sistema FV en pozo de El Desemboque.....	17
Figura 10. Croquis del Sistema FV instalado en El Desemboque.....	18
Figura 11. Datos de irradiación global sobre un plano con inclinación óptima para (a) Punta chueca y (b) El Desemboque (Global Solar Atlas, 2022).....	23
Figura 12. Desglose de pérdidas para el Parque FV de la planta desalinizadora de Punta Chueca (PVWatts, 2022).....	18
Figura 13. Desglose de pérdidas para el Sistema FV del pozo de agua de El Desemboque (Global Solar Atlas, 2022).....	27
Figura 14. Esquema de la estructura utilizada en el Parque FV de Punta Chueca.....	28
Figura 15. Representación 3D del huerto AV comunitario de Punta Chueca.....	29
Figura 16. Representación 3D del huerto AV comunitario para la localidad de El Desemboque	29
Figura 17. Esquemmatización de ángulos que definen la posición del sol.....	30
Figura 18. Esquemmatización de la órbita solar aparente durante los solsticios y equinoccios.....	31
Figura 19. Proyección de rayos de sol en solsticio de verano (caso 1).....	33
Figura 20. Proyección de rayos de sol en solsticio de invierno (caso 2).....	33
Figura 21. Proyección de rayos de sol durante los equinoccios (caso 3).....	34
Figura 22. Índice de sombreado promedio para el medio día solar en los diferentes meses del año	36
Figura 23. Estudio de sombreado del Parque FV de Punta Chueca durante (a) el equinoccio de otoño, (b) el solsticio de verano y (c) el solsticio de invierno.....	37

Figura 24. Estudio de sombreado del Sistema FV de El Desemboque durante (a) el equinoccio de otoño, (b) el solsticio de verano y (c) el solsticio de invierno.....38

Figura 25. (a) Fruto de chiltepín (Riordan et al., 2021) y (b) planta de chiltepín (créditos de imagen: Erin C. Riordan).....39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Desglose de consumo de energía de las distintas cargas eléctricas que conforman planta desalinizadora en Punta Chueca, Sonora (Anexo A).	21
Tabla II. Consumo de energía del pozo de agua dulce de El Desemboque, Sonora.....	22
Tabla III. Desplazamiento de sombra e índice de sombreado durante el medio día solar para distintas estaciones del año.	35
Tabla IV. Resultados de análisis de balance de producción/consumo de alimento, agua y energía para los sistemas AV comunitarios propuestos.....	46

RESUMEN

A la tecnología que combina la generación de energía eléctrica con la producción de alimentos usando sistemas fotovoltaicos (FV) y técnicas agrícolas especiales, se le denomina agrovoltaica (AV). Esta integración tecnológica ha generado gran interés alrededor del mundo, debido a que presenta múltiples beneficios a lo largo de las tres dimensiones del nexo agua-energía-alimentación. Actualmente, las regiones áridas afrontan grandes desafíos para la sostenibilidad agrícola, donde la disponibilidad limitada de agua y los efectos del cambio climático dificultan cada vez más la actividad agrícola con técnicas convencionales. Ante este complejo escenario, los sistemas AV emergen como una solución prometedora que integra la producción de alimentos, el uso eficiente del agua y la generación de energía eléctrica con fuentes renovables. A pesar de sus múltiples ventajas, actualmente la literatura especializada referente a la aplicación de sistemas AV en regiones áridas, aún es escasa.

Este trabajo presenta un estudio de costo-beneficio de la implementación de sistemas AV en ecosistemas áridos en el noroeste de México, específicamente en las localidades de Punta Chueca y El Desemboque. Ambos asentamientos están ubicados a lo largo del litoral del Golfo de California y son parte del territorio de la Nación Comcaac. Para este caso de estudio, se evaluaron dos sistemas AV, con una capacidad FV de 386 kWp y 17.5 kWp respectivamente, cuya función es la de cubrir la demanda energética para el suministro de agua en cada localidad.

El análisis de sombreado en 2D para ambos sistemas AV demostró que el porcentaje de horas de sombra anual es de aproximadamente el 74%. Esto hizo visible la capacidad de estos sistemas para proteger a los cultivos debajo de ellos contra el estrés térmico causado por la irradiación solar directa, la mayor parte del año. Este estudio sugirió también, que los sistemas AV permiten la producción de cultivos a lo largo de todo el año, particularmente aquellos que requieren protección solar en verano e irradiación solar directa durante el invierno. Adicionalmente, con la finalidad de evaluar el potencial productivo de los sistemas AV en la ubicación de interés, se seleccionó la planta de chiltepín como cultivo de prueba. Los resultados del estudio de costo-beneficio demostraron que la producción agrícola reduce significativamente el tiempo de retorno de inversión de un sistema FV. En el caso de producción de chiltepín en modo industrial, este puede ser cercano a un año, mientras que produciendo solo electricidad puede ser superior a una década.

Palabras clave: *sistemas agrovoltaicos, nexo agua-energía-alimentación, Nación Comcaac.*

ABSTRACT

The technology that combines electric power generation with food production using photovoltaic (PV) systems and special agricultural techniques is called agrivoltaics (AV). This technological integration has gained great interest around the world, since it offers multiple benefits along the three dimensions of the water-energy-food nexus. Currently, arid lands around the world are facing great challenges to achieve agricultural sustainability, where the limited available water and the effects of climate change make it ever harder to conduct conventional agricultural practices. In response to this complex scenario, agrivoltaic systems emerge as a promising solution that integrates food production, efficient water usage and power generation using renewable energy. Despite of its multiple advantages, specialized literature discussing the implementation of AV in arid lands is still scarce.

This work presents a costs-benefits study for the implementation of AV systems in arid ecosystems of northwestern Mexico, specifically in the towns of ‘Punta Chueca’ and ‘El Desemboque’. Both settlements are located along the Gulf of Mexico’s coast and are within the Comcaac Nation territory. This case study evaluated two AV systems with PV capacities of 386 kWp and 17.5 kWp respectively, which main purpose is to provide the energy needed for the water supply at both locations.

A 2D shading analysis for both AV systems showed that the percentage of annual ‘shade hours’ is approximately 74%. This made visible the capability of these systems to protect the cultivating area underneath them against thermal stress caused by direct solar irradiance, most of the year. This study also suggested that AV systems can be used for growing crops all year round, particularly those that require shade in the summer and direct solar irradiance during the winter. Additionally, with the aim of evaluating the productivity potential of AV systems in the site of interest, ‘chiltepin’ plant was chosen as test crop. The results of a costs-benefits study showed that food production significantly reduced the return on investment for a PV system. In the case of industrial production of ‘chiltepin’ pepper, it can be close to one year, whereas it can be greater than one decade if it only produces electricity.

Key words: *agrivoltaic systems, water-energy-food nexus, Comcaac Nation.*

NOMENCLATURA

A_{FV}	Área total efectiva de módulos fotovoltaicos [m ²]
C_{ED}	Consumo de energía diario [kWh]
E	Energía [J]
G_{STC}	Irradiancia global en condiciones de prueba estándar [kW/m ²]
$G_{TI_{opta}}$	Irradiancia global promedio diaria sobre plano con ángulo óptimo de inclinación [kWh/m ² /día]
g	Fuerza de gravedad terrestre [m/s ²]
F_{Loss}	Factor de pérdidas totales del sistema fotovoltaico
h	Altura [m]
h_{FV}	Altura del arreglo fotovoltaico con respecto al nivel del suelo
HSP	Horas solar pico [h]
I_s	Índice de sombreado
L	Longitud de la sección de cultivo [m]
L_2	Longitud de desplazamiento de sombra [m]
L_3	Longitud de la sección de cultivo sombreada [m]
m	Masa [kg]
$P_{FV_{Ideal}}$	Potencia fotovoltaica requerida ideal [kW]
$P_{FV_{Real}}$	Potencia fotovoltaica requerida real [kW]
$P_{FV/A}$	Producción de potencia por unidad de área efectiva de módulos fotovoltaicos [kW/m ²]
α	Ángulo de elevación solar [°]
δ	Ángulo de declinación solar [°]
θ_z	Ángulo cenital [°]
ϕ	Latitud [°]
ω	Ángulo horario [°]

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AV	Agrovoltaico
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FV	Fotovoltaico
GDBT	Gran Demanda Baja Tensión
GSA	Atlas Solar Global (por sus siglas en inglés)
LER	Relación Equivalente de Tierra (por sus siglas en inglés)
NaOCl	Hipoclorito de sodio
NaHCO ₃	Hidrocarbonato de sodio
NREL	Laboratorio Nacional de Energía Renovable (por sus siglas en inglés)
MXN	Pesos Mexicanos
PDBT	Pequeña Demanda Baja Tensión
PRONACES	Programas Nacionales Estratégicos (CONAHCYT-México)
PSH	Plataforma Solar de Hermosillo
USD	Dólares Estadounidenses (por sus siglas en inglés)
WEF	Agua-Energía-Alimento (por sus siglas en inglés)

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Es imperativo que para que una población se desarrolle de forma saludable, se cubran sus necesidades básicas de acceso al agua potable, energía y alimentos nutritivos. Al integrar la provisión de estos servicios a gran escala, se hace evidente el entrelazado nexo que existe entre los sectores hídrico, energético y alimentario, manejado comúnmente en la literatura como el “*WEF Nexus*” (por sus siglas y traducción al inglés).

Un antecedente al nexo WEF es el libro publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) “*The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk*”, (Dubois, 2011). En este documento se menciona el papel que juegan el terreno arable disponible y el agua en la producción de alimentos. De igual manera, este trabajo resalta la necesidad de energía para la producción alimentos. En esta publicación se establece como marco de referencia al “*nexo agua-energía-alimentación*”, para explicar las complejas interrelaciones que existen entre la obtención de estos vitales recursos.

Sumado a esto, mientras la humanidad se aproxima a los límites planetarios, cada vez es más frecuente que los sectores energético, hídrico y alimentario se vean en la necesidad de competir por el uso de suelo, recursos naturales, etc., irónicamente al mismo tiempo de necesitarse entre sí. Un claro ejemplo y de interés particular para este trabajo, es la competencia de los sectores alimentario y energético por el uso de suelo. Por una parte, la producción de alimentos, que requiere vastas extensiones de tierra es indudablemente prioritario ya que atiende el tema de seguridad alimentaria. Por otra parte, el despliegue de plantas de producción de energía limpia, esenciales para la soberanía energética de las naciones y la mitigación del cambio climático, ‘amenazan’ con reducir el espacio requerido para la producción de alimentos. Ante este desafío de producir “más con menos”, el nexo WEF resulta ser una herramienta clave para la búsqueda de soluciones integrales que satisfagan las necesidades básicas de la humanidad y los ecosistemas.

En este contexto, una solución integral para la competencia por el uso de suelo de las plantas fotovoltaicas y las actividades agrícolas son los sistemas agrovoltaicos (AV). Esta integración se ha evaluado de manera práctica principalmente en países de Europa y en Japón, demostrando ser altamente efectiva (Toledo y Scognamiglio, 2021).

Los resultados han demostrado también que además de hacer uso óptimo del suelo (Weselek et al. 2019), los sistemas AV reducen significativamente el consumo de agua de los cultivos, mientras que la evapotranspiración de las plantas disminuye ligeramente la temperatura de los módulos fotovoltaicos. Estas características hacen que los sistemas AV sean altamente atractivos para su implementación en regiones áridas, donde la escasez de agua y las altas temperaturas dificultan la producción agrícola, mientras que el recurso solar es abundante (Burney et al 2010; Dinesh y Pearce, 2016; Randle-Boggis et al, 2021).

Un ejemplo exitoso de implementación de sistemas AV en regiones áridas se muestra en un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Arizona. En este trabajo observó que algunas plantas tolerantes a la sombra pueden triplicar su producción con un mismo consumo de agua, mientras que otras ofrecen una producción similar, sin embargo con una eficiencia 1.5 veces mayor en el uso de agua (Barron-Gafford et al., 2019). Actualmente, este grupo de investigación, en colaboración con la Universidad de Sonora y otras instituciones, se encuentra trabajando en la implementación de estos sistemas AV en la Nación Comcaac.

Con la intención de contribuir a este esfuerzo colaborativo y con considerando los enormes beneficios que prometen los sistemas AV en zonas rurales (Weselek et al., 2019), en este trabajo se presenta el diseño y un análisis preliminar de huertos AV comunitarios. De manera particular, este trabajo propone la conversión de dos sistemas fotovoltaicos (FV) en huertos AV comunitarios. Dichos sistemas FV actualmente proveen energía para la operación de una planta Desalinizadora y un pozo de agua dulce en las localidades de Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente. Entre los objetivos principales de este proyecto se encuentran: conocer si efectivamente ambos sistemas FV cubren el 100% del consumo energético para el suministro de agua en ambas localidades, realizar un estudio de sombreado en 2D para conocer el porcentaje de sombra a lo largo de todo el año, así

como realizar un estudio de costo-beneficio de la conversión de ambos sistemas FV en AV, utilizando como cultivo de estudio al chiltepín.

1.2. ANTECEDENTES

En el árido noroeste de México, en el estado de Sonora, colindantes con el Golfo de California, se encuentran las localidades de Punta Chueca y El Desemboque. Estas son las dos mayores poblaciones dentro de la Nación Comcaac, cuyos habitantes también son conocidos de manera coloquial como los Seris. Punta Chueca “*Socaaix*” (en lengua seri) forma parte del municipio de Hermosillo, mientras que El Desemboque “*Haxöl Iihom*” (en lengua seri), forma parte del municipio de Pitiquito, como se muestra en la Figura 1.

Ambas localidades son patrimonio cultural de México y del mundo ya que han estado presentes en la zona desde tiempos inmemorables. Su cultura y conocimientos en temas como la flora, la fauna local y sus aplicaciones para la medicina natural que ellos practican son invaluable. Adicionalmente, su lengua, el “*cmiique iitom*” se considera una lengua aislada, ya que no se ha encontrado relación entre ella y otras lenguas indígenas de México. Siendo los Comcaac una cultura milenaria, por muchos años han vivido de forma nómada siguiendo los ciclos de pesca. A causa de la colonización y globalización se han ido desplazando hacia la costa, hasta que eventualmente durante el siglo XX se vieron obligados a optar por un estilo de vida sedentario. En este modo de vida sus principales fuentes de sustento han sido la caza, la pesca y la recolección.

A pesar de que la comunidad presenta interés en incursionar en la agricultura, hasta el día de hoy no ha sido explotada presumiblemente debido a la escasez e intermitencia histórica en el suministro de agua. Afortunadamente, el acceso al agua potable se ha ido normalizando en los últimos años y diversas organizaciones han logrado junto con la población implementar pequeños huertos familiares para la producción de hortalizas para autoconsumo.

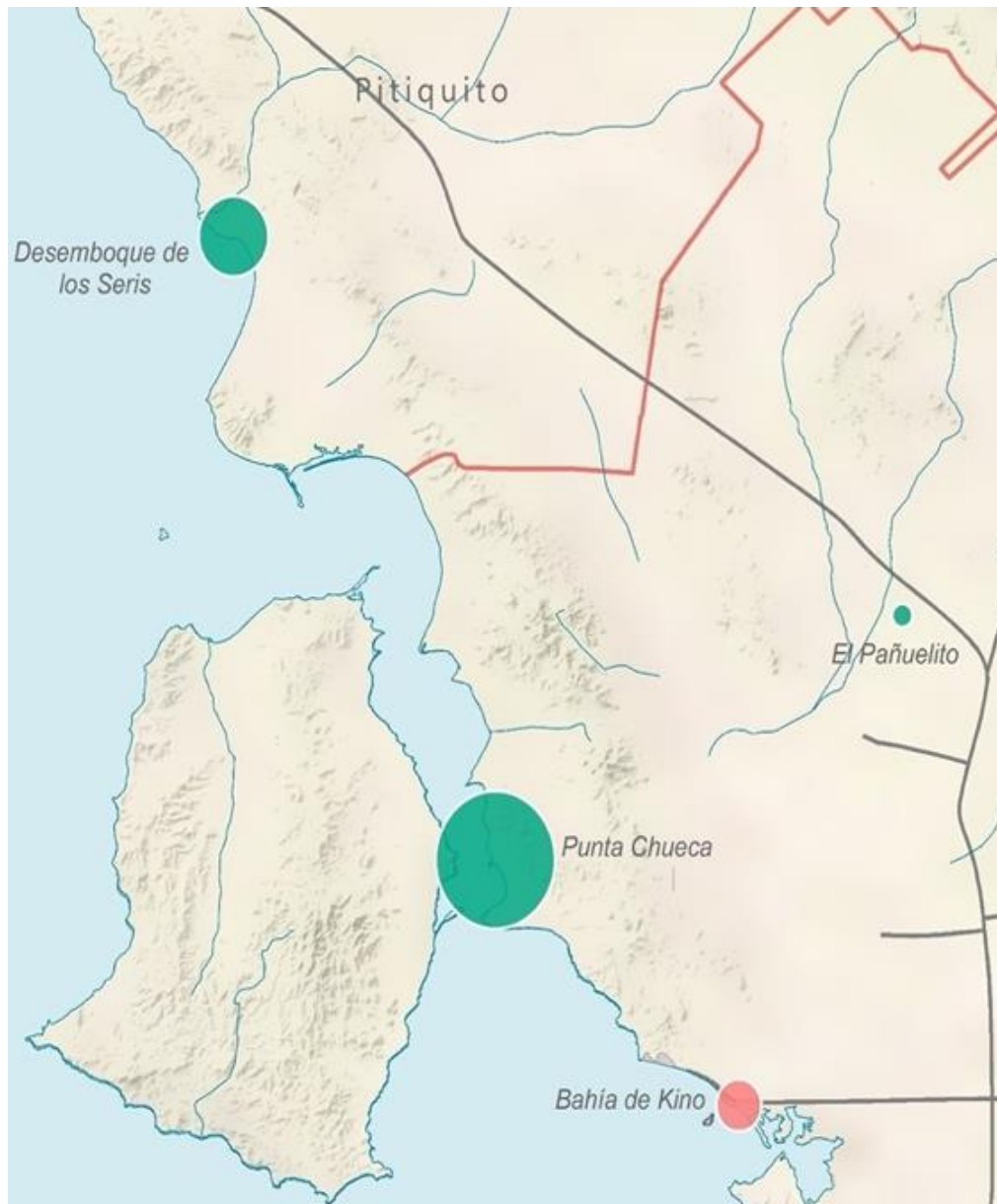


Figura 1. Ubicación de los asentamientos de la Nación Comcaac (Luque-Agraz et al., 2016).

Por otra parte, a pesar de que la red eléctrica llegó hace varias décadas a Punta Chueca y El Desemboque, la seguridad energética aún no se ha logrado para todos sus habitantes. El costo de la tarifa eléctrica en ocasiones supera la capacidad de pago durante los tiempos de veda de pesca, baja actividad económica y/o se dificulta por la falta de infraestructura para el pago por el servicio localmente.

De manera relevante para este proyecto, es el hecho que el suministro de agua potable en ambas localidades está estrechamente ligado al suministro de energía eléctrica localmente. En la población de Punta Chueca, el 100% del suministro de agua proviene de una planta desalinizadora, (Figura 2a), cuyo consumo eléctrico hasta la fecha ha sido cubierto por Agua de Hermosillo. En la población de El Desemboque, el 100% del suministro de agua proviene de un pozo de agua dulce (Figura 2b), cuyo consumo eléctrico debe ser pagado mensualmente por los propios habitantes.

En ambas localidades el consumo eléctrico para el suministro de agua potable es considerable, sumando la capacidad variable de pago y lo remoto de las localidades y el riesgo a endeudamiento es alto. Esto hace ambas localidades altamente vulnerables al corte de suministro de agua por recibos de servicio eléctrico vencidos.



Figura 2. (a) Planta desalinizadora de Punta Chueca, Sonora y (b) Pozo de agua dulce en El Desemboque, Sonora.

De esta manera, el uso de sistemas FV en ambas localidades prometen minimizar el consumo de energía para el suministro de agua, mientras que su conversión a sistemas AV comunitarios promete facilitar la seguridad alimentaria con un mínimo consumo de agua. Esta integración promete a su vez reducir problemas de salud derivados de una nutrición altamente dependiente de alimentos procesados, particularmente durante la temporada de veda de pesca.

Como caso de estudio, en este trabajo se evaluó la producción de chiltepín (*Capsicum annuum* variedad *glabriusculum*) para los huertos AV comunitarios en ambas

localidades. Este cultivo se seleccionó por ser una planta potencialmente adaptable al ecosistema, ser tolerante a la sombra y a su vez, ser un producto de alto valor en el mercado. Para este estudio se consideró tanto la producción en modalidad silvestre como en modalidad industrial conservando los cuidados que les permita certificarse como cultivo orgánico. Finalmente, se optó por la técnica de riego presurizado por goteo para minimizar el consumo del recurso hídrico (Burney et al 2010).

1.3. JUSTIFICACIÓN

El propósito de este trabajo es realizar un análisis preliminar del potencial de los sistemas AV a escala comunitaria, con el fin de contribuir a los esfuerzos de apoyo a la Nación Comcaac para lograr su seguridad energética, hídrica y alimentaria. Es importante mencionar que, a la fecha, tanto la aplicación de sistemas AV en esta zona costera del norte de México, así como su potencial para beneficiar a la Nación Comcaac en particular, aún no ha sido estudiado. De manera académica, mediante este trabajo se pretende aplicar de manera práctica los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, al mismo tiempo de adquirir nuevos mediante una experiencia de trabajo de investigación en un entorno real. Finalmente, se espera que los resultados obtenidos en este trabajo de tesis sirvan como referencia para su implementación en otras comunidades apartadas con problemas de inseguridad hídrica, energética y alimentaria.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Conocer el estado del arte de la tecnología AV y proponer un diseño de huerto agrovoltaico para uso comunitario en asentamientos aislados en regiones áridas, tomando como caso de estudio las localidades de Punta Chueca y El Desemboque, Sonora.

1.4.2. Objetivos Específicos

- I. Investigar el estado del arte de los sistemas AV a nivel global.
2. Identificar especies de hortalizas y plantas medicinales que sean tolerantes a la sombra, que estén dentro de la dieta y tradiciones Comcaac y que a su vez tengan potencial de explotación comercial.
3. Diseñar un sistema AV para la producción de al menos una de las especies de hortalizas o plantas medicinales identificadas como potenciales para la Nación Comcaac.
4. Presentar una ponencia en un congreso académico de nivel nacional.

1.5. METODOLOGÍA

La metodología que se propone para llevar a cabo este trabajo de investigación incluye los siguientes pasos:

1. Investigar el estado del arte de sistemas AV en general.
2. Investigar acerca de la implementación de sistemas AV en regiones áridas.
3. Consultar y hacer un listado de especies de plantas (para la producción de alimentos y medicinales) tolerantes a la sombra que estén dentro de la dieta y cultura de la Nación Comcaac.
4. Seleccionar al menos una especie del listado anterior (usando como criterios de selección, su nivel de demanda dentro de la comunidad, su potencial de explotación comercial, etc).
5. Investigar acerca de los cuidados de la especie de cultivo seleccionada para evaluar su factibilidad de producción en un sistema AV.
6. Realizar el dimensionamiento del sistema FV para la provisión del 100% de la energía necesaria para la operación de la planta desalinizadora de Punta Chueca y del pozo de la

localidad de El Desemboque; de acuerdo con la disponibilidad de recurso solar y las condiciones meteorológicas usando herramientas como PVWatts y Global Solar Atlas.

7. Proponer un espaciamiento y altura para el arreglo FV que permita el cultivo de la especie seleccionada debajo de los mismos.

8. Estimar la producción eléctrica anual y la capacidad de producción de alimentos por los sistemas AV, así como determinar su consumo de agua.

9. Realizar un análisis de costo-beneficio de los sistemas AV comunitarios propuestos para ambas localidades.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En esta sección se presenta una revisión bibliográfica de la tecnología AV, con particular interés en su implementación en regiones áridas.

2.1. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA AGROVOLTAICA

El término “*agrovoltaico*” aplicado a la tecnología que lleva su nombre, es una combinación de las palabras “*agricultura*” y “*voltaica*”. Esta última palabra hace referencia a la conversión de energía solar en electricidad a través de módulos fotovoltaicos. En esencia, esta tecnología consiste en hacer un mismo uso de suelo para la producción simultánea de cultivos y la generación de electricidad a partir de energía solar fotovoltaica.

La idea original de combinar la implementación de módulos fotovoltaicos con actividades agrícolas fue propuesta por investigadores del Instituto Fraunhofer, Adolf Goetzberger y George Zastrow, en su artículo titulado “*On the Coexistence of Solar Energy Conversion and Plant Cultivation*” Goetzberger y Zastrow., (1982). Mediante un estudio teórico, demostraron que los sistemas fotovoltaicos convencionales podían adaptarse para permitir el crecimiento homogéneo de ciertas plantas de manera simultánea con la generación de energía eléctrica (Figura 3). En su trabajo, (que consideró el recurso solar y el movimiento solar aparente a lo largo del año para Alemania), se observó que, al montar los módulos a 2 metros de altura sobre el suelo, con una distancia entre filas equivalente a 3 veces el alto de los módulos, se puede obtener una irradiancia casi uniforme (integrándose a lo largo del día).

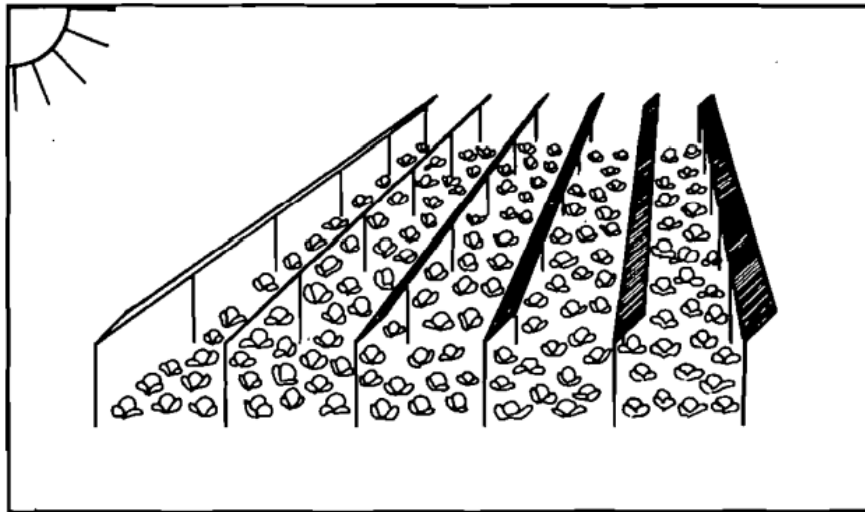


Figura 3. Propuesta de sistema AV de (Goetzberger y Zastrow, 1982).

Aunque para la década de los años 80, producir electricidad con energía solar fotovoltaica ya era un concepto prometedor, la tecnología aún requería reducir sus costos de producción y aumentar su eficiencia para ser económicamente viable. No fue hasta el año 2000, cuando sus precios empezaron a ser más competitivos comercialmente y por tanto implementarse a gran escala (IRENA 2019). Paralelamente, la tecnología agrovoltaica comenzó a tomar relevancia, y se fue implementado gradualmente (principalmente en países europeos), décadas después de su invención. De igual manera lo hizo su nombre; entre los términos más comunes en español se encuentran: agrofotovoltaica, agricultura fotovoltaica, solar compartida y agrosolar.

Por su parte, la comunidad científica siguió de cerca e incluso promovió la implementación de la tecnología AV, dando pie a descubrimientos relevantes y el desarrollo de técnicas para maximizar la producción de alimentos y la generación de energía. En Francia utilizaron la “Relación de Equivalencia de Tierras” (LER, por sus siglas en inglés), como indicador de la productividad de la tierra con usos múltiples. Las simulaciones revelaron que los sistemas AV pueden ser altamente productivos, con incrementos de la productividad global de la tierra de hasta un 60–70% (Mead y Willey, 1980). Sin embargo, en la literatura se ha sugerido la realización de investigaciones más

profundas acerca de los efectos micro climáticos que tienen los sistemas FV sobre los cultivos, además de la necesidad de evaluar los sistemas AV en diferentes latitudes (Dupraz et al., 2011).

Dinesh y Pearce, (2016) desarrollaron un modelo de simulación acoplado tanto para la producción de energía a través de módulos FV (PVSyst) y la producción agrícola (STICS), con el fin de demostrar el potencial de los sistemas AV. Los resultados obtenidos mostraron que, con la generación de electricidad se pueden aumentar en un 30% las utilidades en actividades agrícolas, y que es recomendable la utilización de cultivos tolerantes a la sombra para minimizar las pérdidas de rendimiento. En otro estudio realizado por Valle et al., (2017), se encontró que la implementación de seguimiento solar en los sistemas AV aumentaba la cantidad de energía producida, mientras que la producción agrícola se mantenía prácticamente constante.

Weselek et al., (2019) realizaron una revisión bibliográfica de la tecnología AV con el fin de identificar las aplicaciones, retos y oportunidades de esta tecnología a nivel global. Entre los hallazgos más relevantes se menciona que los sistemas AV pueden incrementar la productividad del terreno en un 70%, al combinar actividades agrícolas con la producción de energía. Asimismo, que los sistemas AV ofrecen una gran oportunidad para el desarrollo económico en comunidades marginadas y/o aisladas de la red. Sumado a esto, que los sistemas AV tienen una aplicación ideal en tierras áridas, donde la sombra ofrecida por los módulos FV promete una reducción significativa en el consumo de agua.

Por su parte, Toledo y Scognamiglio (2021), realizaron un análisis de las diferentes opciones de diseño para los sistemas AV construidos a la fecha (ver Figura 4). En este trabajo clasificaron a los sistemas AV en sistemas abiertos y cerrados. Subsecuentemente, los sistemas abiertos los categorizaron como elevados y a nivel de suelo. En los sistemas elevados, los módulos FV se encuentran montados sobre una estructura de 2 a 5 metros de altura, que permite el acceso a maquinaria agrícola, mientras que los sistemas a nivel de suelo son para cultivos de baja altura. En el caso de los sistemas AV cerrados, los módulos FV son integrados o bien son parte de la envolvente del cultivo, generalmente un invernadero.

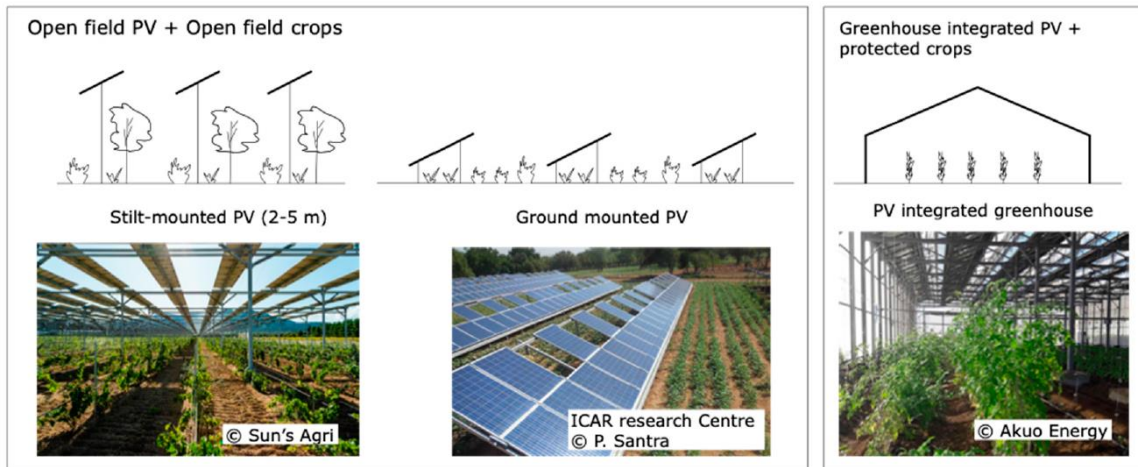


Figura 4. Diferentes tipologías de sistemas AV (Toledo y Scognamiglio, 2021).

En tierras áridas, investigadores de la Universidad de Arizona han sido pioneros en la evaluación práctica de sistemas AV en la región. En uno de sus más recientes trabajos Barron-Gafford et al., (2019) realizaron el cultivo experimental de chiltepin (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), jalapeño (*Capsicum annuum* var. *annuum*) y tomate (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*). En sus observaciones notaron una reducción en las temperaturas de operación de los módulos FV y del microclima debajo de ellos; así como una amortiguación en las fluctuaciones diarias en la humedad del suelo.

Sumado a esto, la sombra ofrecida por los módulos FV redujo el estrés térmico sobre las plantas, resultando en una mayor producción de frutos con un mismo consumo de agua y/o una misma producción con menor uso de agua. Estos resultados demostraron que un sistema AV ofrece múltiples beneficios a lo largo de las tres dimensiones del nexo agua-energía-alimentación, particularmente en regiones áridas. En estas zonas, que comprenden el 41.2% de la masa continental global y actualmente habita aproximadamente un tercio de la población mundial (UN, 2019), es imprescindible la implementación de soluciones que aumenten su resiliencia ante la variabilidad climática y global.

En 2021, la capacidad AV instalada a nivel global se estimó en 14 GWp y esta cifra sigue en aumento (Steher et al., 2023). Con una capacidad proyectada de 1 GWp, el proyecto agrovoltaico más grande del mundo a la fecha, se encuentra en una granja para el cultivo

de bayas en la provincia de Ningxia, en el borde del desierto de Gobi en China (Bellini, 2020).

Mientras tanto, la comunidad científica continúa siguiendo de cerca la implementación sistemas AV, con el fin de promover el avance de esta tecnología. En Alemania, el Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energía Solar (Fraunhofer ISE), además de estar a la vanguardia en investigación científica en sistemas AV, lleva a cabo proyectos piloto en distintas ubicaciones geográficas para la evaluación de esta tecnología. Estas ubicaciones incluyen Alemania, Chile, Mali y Gambia, estas últimas tres de gran interés por encontrarse en zonas áridas y de alta vulnerabilidad climática (Trommsdorff et al., 2022).

Con el fin de contribuir a estos esfuerzos globales, facilitar la implementación de la tecnología agrovoltaica en la región y aportar al proyecto CONAHCYT – PRONACE 319483 en curso (“Seguridad energética, hídrica y alimentaria para pueblos originarios en regiones costeras semi-áridas del Norte de México”), a continuación, se presenta el diseño de dos huertos AV de uso comunitario para la Nación Comcaac.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE HUERTOS AGROVOLTAICOS COMUNITARIOS

En este capítulo se describe detalladamente el proceso de diseño de los huertos AV comunitarios para las localidades de Punta Chueca y El Desemboque. Este capítulo inicia con un ejercicio de dimensionamiento FV para corroborar que los sistemas que se encuentran actualmente instalados en ambas localidades cuentan con la capacidad suficiente para garantizar el suministro de agua a lo largo de todo el año. Posteriormente se realiza un ejercicio de dimensionamiento AV, iniciando con un estudio de sombreado en 2D para estimar el índice de sombreado sobre el área de cultivo. Seguido a esto, se presenta el modelado 3D resultante de la conversión de ambos sistemas FV a AV, acompañado de un estudio de sombreado para las diferentes estaciones del año. Finalmente, se describe el proceso de selección del cultivo que se utilizó para el estudio de costo-beneficio en este trabajo de investigación.

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS FV

Durante visitas de campo a la Nación Comcaac se observó que ambas localidades ya contaban con sistemas FV instalados. En Punta Chueca, una planta FV de 386 kWp había sido construida recientemente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para compensar el consumo energético diario de una planta desalinizadora. De igual manera en El Desemboque, con el apoyo de la fundación estadounidense Honnold, recientemente se había instalado un sistema FV de 17.5 kWp, para compensar el consumo de energía de un pozo que provee de agua dulce a toda la localidad.

3.1.1. Parque FV de Punta Chueca

Con coordenadas 29°00'49.1" N, 112°09'20.6" E, los módulos FV se encuentran montados en estructuras elevadas del suelo orientadas hacia el suroeste aproximadamente a 196° y

con una inclinación de 27° (ver Figura 5). La altura libre debajo de los módulos es de 2.7 metros en la parte más baja y 6 metros en la parte alta, por lo que es factible el tránsito de maquinaria agrícola y el crecimiento de cultivos tolerantes a la sombra de altura considerable.



Figura 5. Parque FV de 386 kWp en Punta Chueca, Sonora.

Este parque FV está constituido por 702 módulos FV de 480 Wp y 5 inversores con capacidad de 62.5 kWp cada uno, conectados a un transformador de corriente de 500 kVA, como se observa en la Figura 6.

DIAGRAMA UNIFILAR DE SISTEMA FOTOVOLTAICO - PUNTA CHUECA

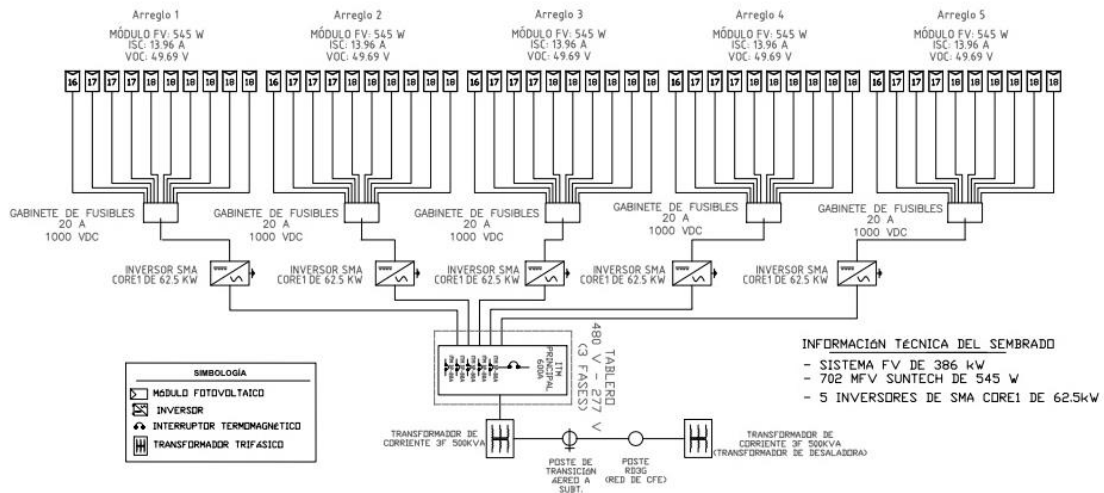


Figura 6. Diagrama eléctrico unifilar del Parque FV de Punta Chueca.

El terreno que ocupa el parque FV, de acuerdo a los datos recopilados durante esta investigación, es de 1 hectárea (E. Utrilla, comunicación personal, 21 de abril de 2022). En la Figura 7, se presenta un croquis del parque FV.

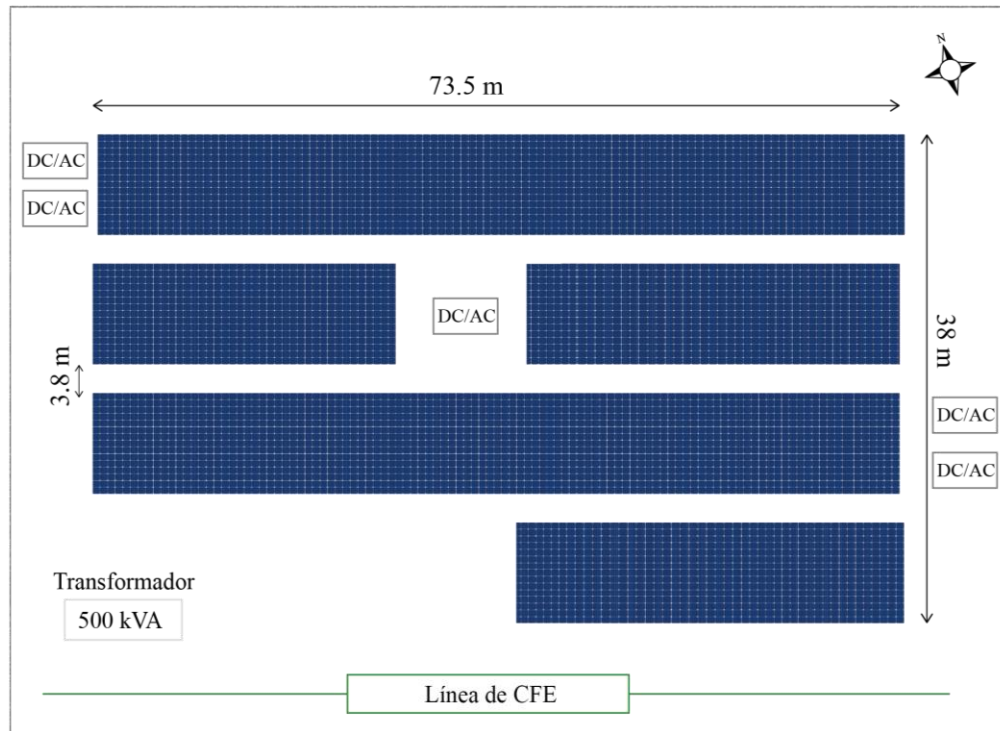


Figura 7. Croquis del Parque FV instalado en Punta Chueca, Sonora.

3.1.2. Sistema FV de El Desemboque

Con coordenadas 29°34'06" N, 112°22'51" O, los módulos FV están montados sobre una sola estructura de aluminio y orientados hacia el sur con una inclinación de 29° (Figura 8). La altura libre debajo de los módulos es de 1.5 metros en su parte más baja y de 3.4 metros en la parte alta. En este caso, la baja elevación de la estructura limita la altura de los cultivos a producir, así como incrementa el riesgo de daño por la realización de actividades agrícolas debajo de los módulos FV.



Figura 8. Sistema FV de 17.5 kWp en pozo de El Desemboque, Sonora.

El sistema instalado se encuentra actualmente interconectado a la red de CFE. Como se muestra en la Figura 9, este sistema está constituido por 46 módulos fotovoltaicos de 380 Wp y 3 inversores (2 de 5 kWp y 1 de 6 kWp) conectados a un transformador de corriente de 45 kVA. En la Figura 10 se presenta un croquis del sistema FV en el Pozo de El Desemboque.

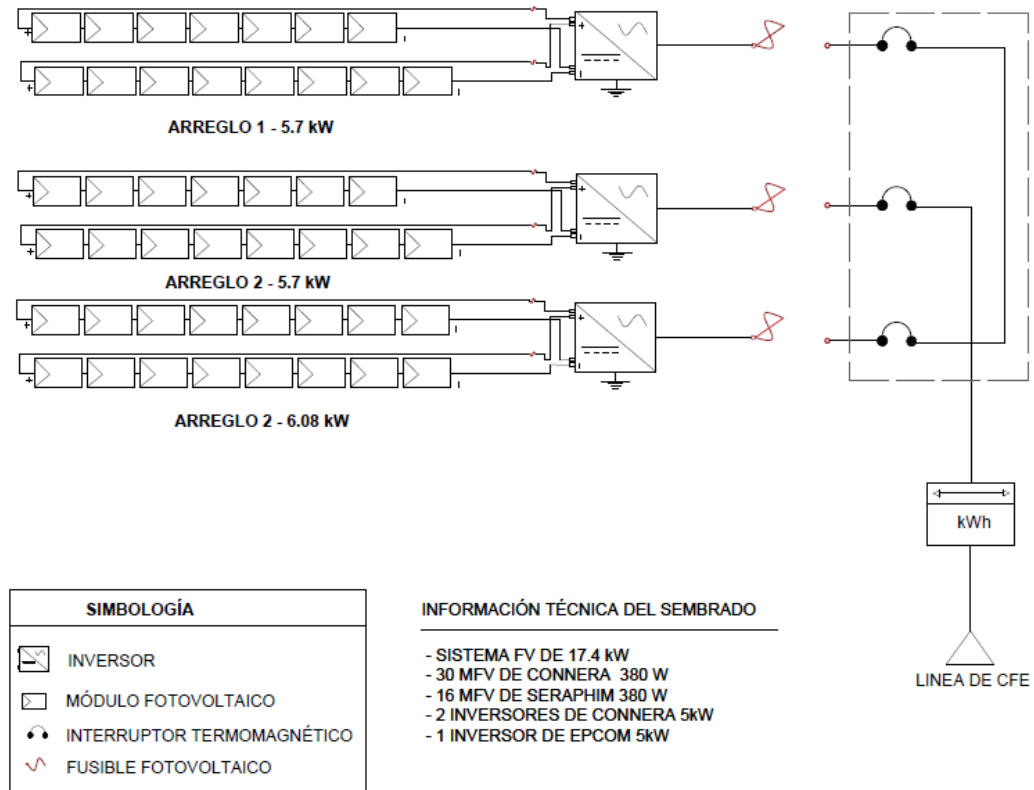


Figura 9. Diagrama eléctrico unifilar del Sistema FV en pozo de El Desemboque

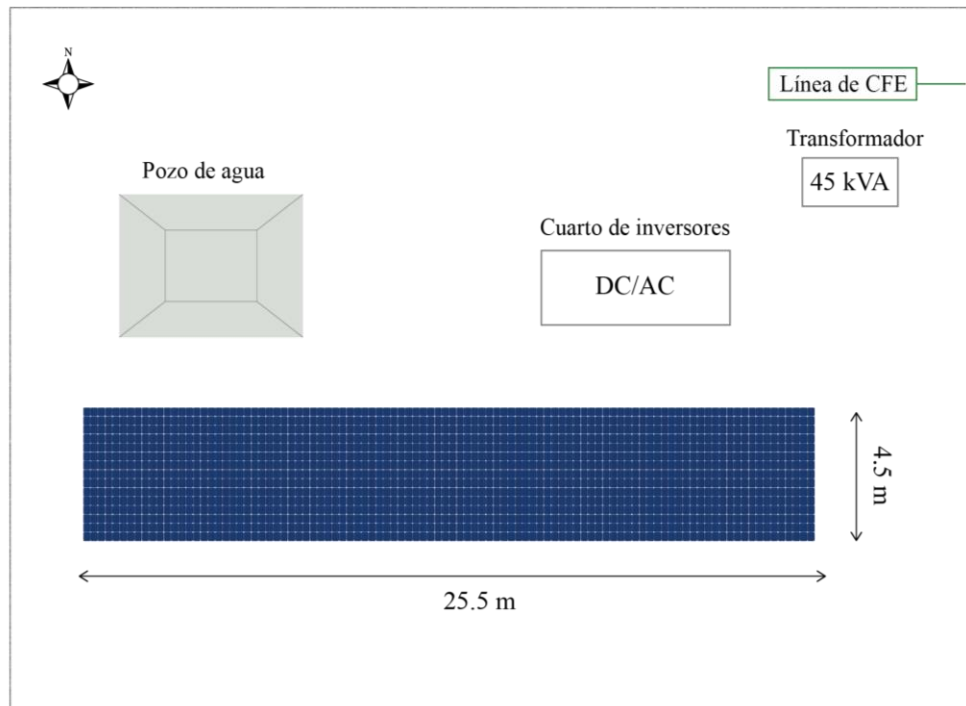


Figura 10. Croquis del Sistema FV instalado en El Desemboque.

3.2. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS FV

En esta sección se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento de los sistemas FV de cada localidad. Este ejercicio se llevó a cabo con el fin de conocer el tamaño real que debe tener cada sistema FV para compensar el total de la energía requerida por la planta desalinizadora y por el pozo de agua dulce. Así mismo, para conocer el porcentaje de cobertura de energía de los sistemas FV actualmente instalados en ambas localidades a lo largo de todo el año. Este proceso de dimensionamiento consistió esencialmente de tres pasos: estimación de consumo de energía, cálculo de la capacidad fotovoltaica requerida y validación de cálculos usando la herramienta PVWatts de NREL. Estos pasos se describen detalladamente a continuación para cada localidad.

3.2.1 Estimación de consumo de energía

El consumo de energía de la planta desalinizadora se estimó utilizando la ficha técnica de dicha planta, mientras que para el pozo de El Desemboque se obtuvo directamente de los datos contenidos en el recibo de CFE. A continuación, se describen detalladamente los pasos llevados a cabo para la estimación del consumo anual de energía para cada localidad.

3.2.1.1. Consumo de Planta Desalinizadora de Punta Chueca

En el caso de Punta Chueca, al tratarse de una planta de reciente construcción y por consiguiente no contar con un recibo de CFE (a la fecha de esta investigación), el consumo energético diario se estimó utilizando los datos técnicos de dicha planta desalinizadora (Anexo A). El cálculo fue realizado mediante una sumatoria del consumo individual diario de todas las cargas eléctricas de la misma. Para esta estimación, se consideró una operación de 23.5 horas al día para el tratamiento de agua salada, dejando la media hora restante para la limpieza del sistema.

El consumo de potencia de cada una de las bombas se obtuvo de la ficha técnica de la planta desalinizadora. Dicha información estaba denotada en caballos de potencia (hp, por sus siglas en inglés) y fueron convertidas a Watts (W), considerando que 1 hp equivale a 745.7 W. Por otro lado, la potencia de los dosificadores de hipoclorito de sodio (NaOCl) e hidrogenocarbonato de sodio (NaHCO_3) no estaba indicada, por lo que se procedió a calcularla. Esto se logró utilizando como referencia el caudal diario especificado de 0.3 gal/min y 0.5 gal/min para NaOCl y NaHCO_3 , respectivamente, así como una presión de operación de 80 psi para ambos dosificadores.

Para este cálculo, dichos caudales fueron primeramente convertidos a unidades del sistema internacional, resultando en 1.14 L/h para NaOCl y 1.89 L/h para NaHCO_3 . Posteriormente, considerando una operación continua de 23.5 horas y asumiendo que en 1L de agua hay 1kg de masa, suponiendo que las soluciones salinas se comportan

esencialmente igual al agua pura, la masa total suministrada de estas soluciones diarias se estimó en 26.7 kg y 44.5 kg de NaOCl y NaHCO₃, respectivamente.

Finalmente, el consumo de energía para el suministro de soluciones salinas se estimó utilizando la Ec. (1). Para este cálculo se tomó en cuenta que ambas soluciones se encuentran a una presión de 80 psi, siendo su equivalente en altura dinámica (h) de 26.6 m. Este valor se obtuvo considerando que una presión de 1 psi ejercida por un líquido con densidad similar a la del agua equivale a una columna de agua de 0.7 m.

$$E = mgh \quad (1)$$

De esta manera, considerando una masa (m) total suministrada de 26.7 kg de solución de NaOCl, una altura dinámica de 26.6 m y la fuerza de gravedad terrestre (g) de 9.8 m/s², su dosificación resultó en un consumo de 14,704.5 J diarios. En el caso de la solución de NaHCO₃, se consideró una masa suministrada diariamente de 44.5 kg, resultando en un consumo de energía de 24,514 J. Teniendo en cuenta que 3,600 J equivalen a 1 Wh, el consumo de energía diario por el suministro de soluciones de NaOCl y NaHCO₃ equivalen a 4.1 Wh y 6.8 Wh, respectivamente. En la Tabla I, estos valores se muestran en unidades de kWh.

Finalmente, para el sistema de instrumentación y control se asumió un consumo de potencia de 200 W las 24 horas, asumiendo que este consta de dos computadoras con monitor táctil. El consumo de cada uno de los componentes mencionados anteriormente se desglosa en la Tabla I.

Es importante mencionar que una vez que la planta desalinizadora sea conectada a la red eléctrica de la CFE, por sus características eléctricas se visualiza que la tarifa aplicable será la de gran demanda baja tensión (GDBT). En esta tarifa se permite al cliente un consumo de potencia superior a los 25 kW, cuyo precio medio con las características de consumo de la planta desalinizadora se estimó en 1.4 pesos mexicanos (MXN) por kWh (J.A. Colin, comunicación personal, 4 de mayo de 2021).

Tabla I. Desglose de consumo de energía de las distintas cargas eléctricas que conforman la planta desalinizadora en Punta Chueca, Sonora (Anexo A).

Consumo de Energía de Planta Desalinizadora				
Cargas Eléctricas	Potencia		Tiempo de uso	Consumo de Energía
	(hp)	(W)	(h)	(kWh)
Bomba de limpieza	7.5	5,593	0.5	2.8
Bomba de alta presión	40	29,828	23.5	700.9
Bomba de alimentación	7.5	5,593	23.5	131.4
Dosificador de NaOCl	227.8×10^{-6}	0.2	23.5	4.1×10^{-3}
Dosificador de NaHCO ₃	388.7×10^{-6}	0.3	23.5	6.8×10^{-3}
Instrumentación y control	268.1×10^{-3}	200	24	4.8
	Potencia máxima:	41.2 kW	Consumo diario:	839.9 kWh

3.2.1.2 Consumo de energía del Pozo de El Desemboque

El consumo de energía eléctrica del pozo de agua dulce de El Desemboque se obtuvo consultando los recibos de la CFE de los últimos 10 meses a la fecha de esta investigación (junio de 2021 a marzo de 2022). El desglose de consumo y el cobro por mes se muestra en la Tabla II.

Como se puede observar, el consumo total de energía durante ese período de tiempo resultó equivalente a 17,056 kWh. Dividiendo este valor entre los 304 días transcurridos, da como resultado un consumo promedio diario de 56.1 kWh/día. Este consumo se asumió como el consumo promedio diario anual, ya que sucedió durante los meses más cálidos y los más fríos (cuando la demanda de agua de pozo es de esperarse sea la más alta y baja, respectivamente). Además, este cálculo incluyó los meses templados, lo que acerca aún

más este valor de consumo al valor promedio diario anual real. Por otra parte, el precio medio de energía se obtuvo dividiendo el consumo total de energía durante estos 10 meses entre el pago total de energía durante ese período de tiempo, resultando en 3.1 MXN por kWh.

Tabla II. Consumo de energía del pozo de agua dulce de El Desemboque, Sonora.

Mes	Año	Consumo de electricidad (kWh)	Pago por energía (MXN)
Junio	2021	1,813	\$ 5,604
Julio	2021	3,148	\$ 9,730
Agosto	2021	1,988	\$ 6,145
Septiembre	2021	1,363	\$ 4,213
Octubre	2021	1,179	\$ 3,644
Noviembre	2021	1,419	\$ 4,386
Diciembre	2021	2,069	\$ 6,395
Enero	2022	1,780	\$ 5,502
Febrero	2022	1,245	\$ 3,848
Marzo	2022	1,052	\$ 3,252
Total:		17,056	\$ 52,719

Cabe mencionar que la tarifa aplicada al pozo de agua de El Desemboque es la de pequeña demanda baja tensión (PDBT). Esta tarifa de uso general se utiliza para servicios en baja tensión y cuya demanda de potencia no debe exceder los 25 kW. Al igual que en la tarifa GDBT, la estimación del precio medio de energía depende de múltiples factores. Sin embargo, de la Tabla II se puede estimar fácilmente este precio medio dividiendo el pago

total por el consumo de energía entre el consumo total durante el período de interés, resultando en 3.1 MXN/kWh.

3.2.2 Cálculo de capacidad FV requerida

Para estimar la capacidad de potencia FV requerida, primeramente fue necesario consultar los datos de recurso solar locales para la ubicación exacta de ambos sistemas. De manera específica, fueron recuperados datos de “irradiación global promedio diaria sobre un plano con inclinación óptima” del portal de uso libre Global Solar Atlas (GSA, 2022). Cabe mencionar que esta inclinación óptima para un colector solar (comúnmente equivalente a la latitud del sitio) maximiza la irradiancia solar directa a lo largo de todo el año. De esta manera, la irradiancia global promedio diaria a lo largo de un año tanto para Punta Chueca como para El Desemboque resultó en un valor muy similar y cercano a los 6.7 kWh/m². Los valores precisos, acompañados de otros datos relevantes para ambas localidades, se muestran en la Figura 11.

Map data			Per day ▾	Map data			Per day ▾		
<input checked="" type="checkbox"/>	Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	5.300	kWh/kWp per day ▾	<input checked="" type="checkbox"/>	Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	5.299	kWh/kWp per day ▾
	Direct normal irradiation	DNI	7.457	kWh/m ² per day ▾		Direct normal irradiation	DNI	7.212	kWh/m ² per day ▾
	Global horizontal irradiation	GHI	6.042	kWh/m ² per day ▾		Global horizontal irradiation	GHI	5.919	kWh/m ² per day ▾
	Diffuse horizontal irradiation	DIF	1.366	kWh/m ² per day ▾		Diffuse horizontal irradiation	DIF	1.418	kWh/m ² per day ▾
	Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	6.740	kWh/m ² per day ▾		Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	6.666	kWh/m ² per day ▾
	Optimum tilt of PV modules	OPTA	29 / 180	°		Optimum tilt of PV modules	OPTA	30 / 180	°
	Air temperature	TEMP	23.8	°C ▾		Air temperature	TEMP	22.8	°C ▾
	Terrain elevation	ELE	3	m ▾		Terrain elevation	ELE	8	m ▾

Figura 11. Datos de irradiación global sobre un plano con inclinación óptima para (a) Punta chueca y (b) El Desemboque (Global Solar Atlas, 2022).

3.2.2.1. Dimensionamiento de arreglo FV para la planta desalinizadora

Una vez conocidos los datos de irradiancia global para cada localidad, se procedió a estimar el número horas de máximo rendimiento para los módulos FV, mejor conocidas como horas solar pico (*HSP*). Esta aproximación que se muestra en la Ec. (2), se logra dividiendo la irradiancia global promedio diaria sobre un plano con inclinación óptima (GTI_{opta}) entre la irradiancia de condiciones de prueba estándar (G_{STC}) para módulos FV. Esta irradiancia equivalente a 1 kW/m^2 es la utilizada por los fabricantes al momento de evaluar las características eléctricas de sus módulos al completar su construcción y posteriormente plasmarlas en sus hojas de datos.

$$HSP = \frac{GTI_{opta}}{G_{STC}} \quad (2)$$

Posteriormente, utilizando la Ec. (3) se puede estimar la capacidad de potencia ideal ($P_{FVideal}$) del arreglo FV. Tal como se muestra a continuación, este cálculo consiste en dividir el consumo de electricidad diario (C_{ED}) entre las horas solar pico (*HSP*).

$$P_{FVideal} = \frac{C_{ED}}{HSP} \quad (3)$$

Tomando en cuenta que el consumo de electricidad diario de la planta desalinizadora de Punta Chueca corresponde a 839.9 kWh y que se cuenta con 6.7 horas solares pico promedio al año, utilizando la Ec. (3), la capacidad ideal de sistema FV resulta ser de 124.6 kWp. Dado que las condiciones estándar de prueba son condiciones ideales (y por lo tanto difieren de las condiciones reales de operación), se requiere considerar las pérdidas que tendrán los módulos por diversos factores. Entre los factores más relevantes se encuentran la temperatura ambiente, las condiciones atmosféricas, el ángulo de incidencia, depósito de polvo y el propio envejecimiento de los módulos FV.

Para simplificar el proceso de estimación de las pérdidas de producción de energía por los módulos FV en condiciones normales de operación, se utilizó la herramienta de uso libre PVWatts de NREL (PVWatts, 2022). El desglose de las pérdidas de producción de energía se muestra en la Figura 12.

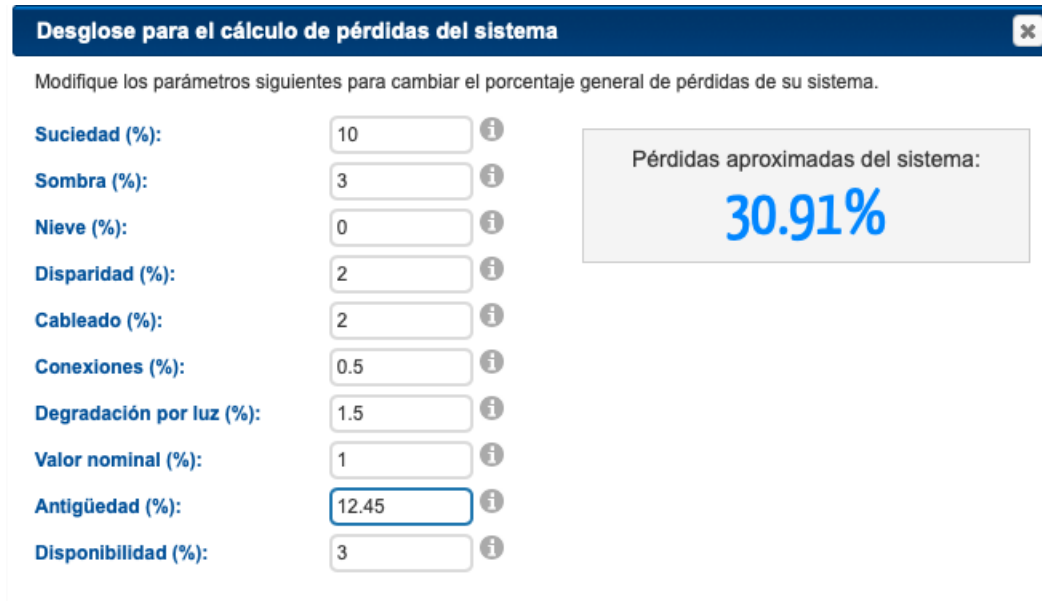


Figura 12. Desglose de pérdidas para el parque FV de la planta desalinizadora de Punta Chueca. (PVWatts, 2022).

El valor de pérdidas por antigüedad se tomó directamente de la hoja de datos del fabricante, el cual especifica una caída de potencia del 2% en el primer año seguido por un decaimiento del 0.6% anual. De esta manera se estimó que en 20 años las pérdidas por antigüedad equivaldrían a 12.5%. El valor de suciedad (e.g. depósito de polvo) se estimó en un 10%. Este valor es similar a los obtenidos en ubicaciones experimentales cercanas al sitio del proyecto, tales como la Plataforma Solar de Hermosillo (PSH), que además comparten el mismo ecosistema semi-árido. Para los demás parámetros se optó por mantener los valores predeterminados recomendados por la herramienta PVWatts.

Para compensar estas pérdidas, se procedió a calcular la capacidad de potencia real requerida del arreglo FV (P_{FVReal}) empleando la Ec. (4) y así cubrir efectivamente la demanda energética diaria.

$$P_{FVReal} = \frac{P_{FVIdeal}}{1 - F_{Loss}} \quad (4)$$

De esta manera, considerando que el tamaño ideal del sistema FV equivale a 124.6 kWp y el factor total de pérdidas de potencia (F_{Loss}) equivalen a 30.9%, la potencia FV requerida para el arreglo fotovoltaico de acuerdo a la Ec. (4) resulta ser de 180.4 kWp. Este valor permite concluir que el parque FV actualmente instalado en Punta Chueca de 386 kWp está sobredimensionado a una razón 2.1 veces mayor (i.e. 114%) para la demanda energética requerida, en base a los datos analizados.

Por otra parte, al conocer la potencia FV requerida, empleando la Ec. (5) se puede visualizar el área total efectiva que sería ser cubierta por módulos FV, y por consiguiente estimar el área potencialmente utilizable para el cultivo de hortalizas.

$$A_{FV} = \frac{P_{FVReal}}{P_{FV/A}} \quad (5)$$

Considerando que los módulos empleados en este proyecto tienen una eficiencia del 21.3%, en condiciones ideales los módulos FV tendrían una capacidad de producción de potencia por unidad de área ($P_{FV/A}$) de 213 W/m². De esta manera, considerando que la potencia requerida es de 180.4 kWp, de acuerdo con la Ec. (5), el área total cubierta por módulos FV resultaría ser de 847 m². Cabe mencionar que la producción por metro cuadrado sería de aproximadamente 147.2 W/m² considerando un 30.9% de pérdidas en condiciones normales de operación. Igualmente, que el espacio requerido por este parque FV será considerablemente mayor, dado el espaciamiento que será necesario para la distribución de un gran número de módulos para evitar el sombreado entre ellos.

3.2.2.2. Dimensionamiento de arreglo FV para pozo de El Desemboque

En el caso del pozo de agua dulce de El Desemboque utilizando, la Ec. (3) se obtuvo un valor de 6.7 horas solar pico para su ubicación geográfica. Tomando en cuenta el consumo promedio diario de 56.1 kWh/día, empleando la Ec. (4), el tamaño ideal del sistema FV resulta ser de 8.4 kWp. Nuevamente se utilizó la herramienta de uso libre PVWatts de NREL para estimar las pérdidas totales de producción de energía de los módulos FV en condiciones normales de operación. El desglose de dichas pérdidas se muestra en la Figura 13.

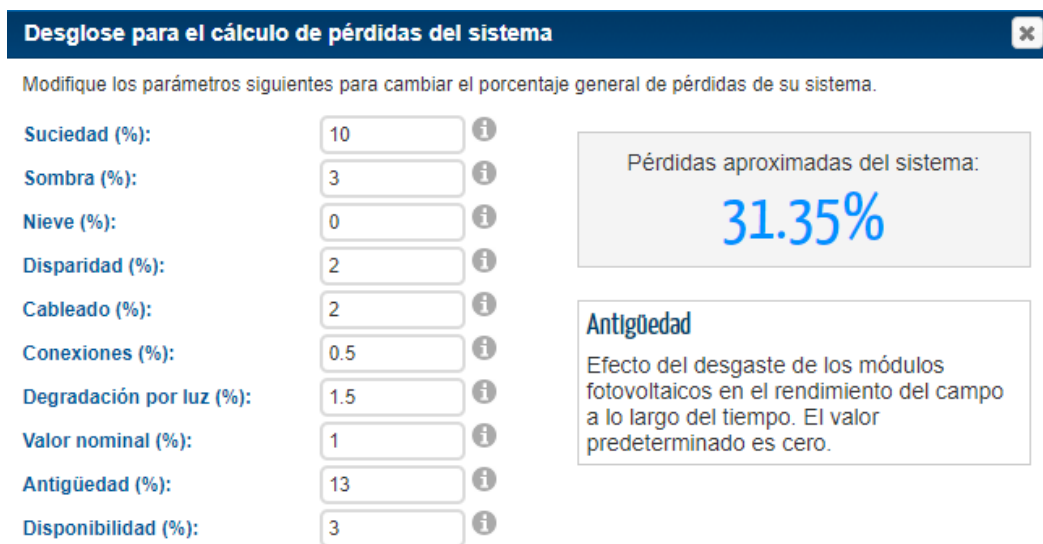


Figura 13. Desglose de pérdidas para el Sistema FV del pozo de agua de El Desemboque (PVWatts, 2022).

El valor de las pérdidas de producción de energía por antigüedad se tomó directamente de la hoja de datos del fabricante, el cual especifica una caída de potencia del 3% en los primeros 5 años, seguido por un decaimiento del 0.55% anual. De esta manera, en 25 años las pérdidas por antigüedad se estiman serían de un 13%. Al igual que en el caso de Punta Chueca, el valor de suciedad se consideró en un 10% y en los demás parámetros se optó por dejar los valores predeterminados recomendados por PVWatts.

De esta manera empleando la Ec. (4) y tomando en cuenta el valor obtenido de 31.35% por pérdidas, se estima que el tamaño del sistema FV requerido es de 12.2 kWp. Teniendo en cuenta que el arreglo FV instalado actualmente en el pozo de El Desemboque tiene una capacidad de 17.5 kWp, el sistema esta sobredimensionado en un 43%, en base a la demanda estudiada.

Finalmente empleando la Ec. (5), considerando que la eficiencia de los módulos FV es de 19.6%, se estima que el área efectiva cubierta por ellos para una capacidad de 12.2 kWp sería de 62.2 m².

3.3 CONVERSIÓN DE SISTEMAS FV A SISTEMAS AV

Como se mencionó anteriormente, los sistemas FV actualmente instalados están montados sobre estructuras con características y dimensiones específicas. Para fines de este estudio se seleccionó la estructura de soporte de los módulos FV de la planta de Punta Chueca, la cual cuenta con las dimensiones que se muestran en la Figura 14.

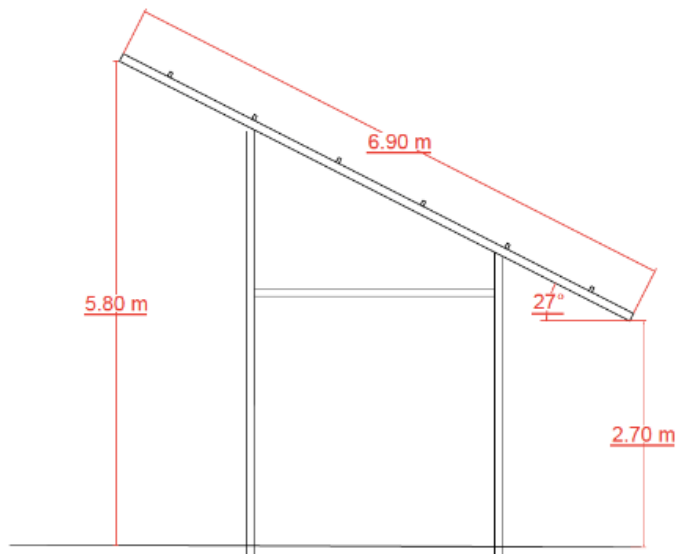


Figura 14. Esquema de la estructura utilizada en el Parque FV de Punta Chueca.

Utilizando este diseño se procedió a la construcción de modelos en 3D para ambos sistemas AV utilizando el programa Sketch Up. El huerto AV comunitario de Punta Chueca se muestra modelada en la Figura 15.

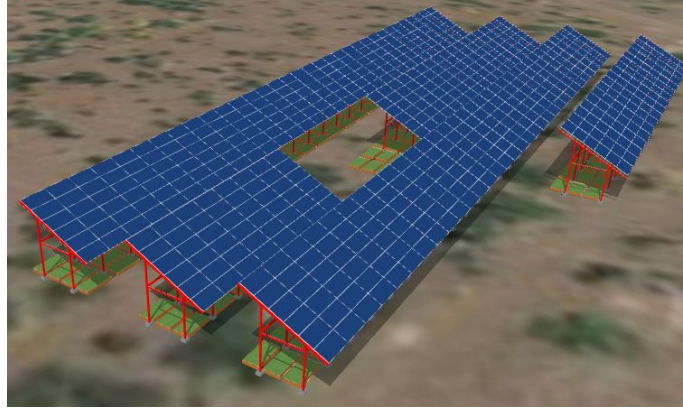


Figura 15. Representación 3D del huerto AV comunitario de Punta Chueca.

Para el huerto AV comunitario de El Desemboque, en este trabajo se propone un diseño estructural similar al de Punta Chueca. Esta propuesta considera una mayor elevación y una diferente distribución para los módulos FV, con el propósito de facilitar el acceso a las camas de cultivo y que varias familias puedan trabajar simultáneamente. Este diseño se muestra en la Figura 16.

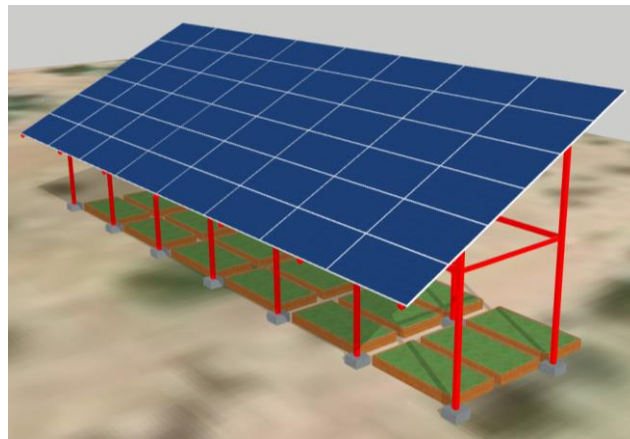


Figura 16. Representación 3D del huerto AV comunitario para la localidad de El Desemboque.

3.3.1 ESTUDIO DE SOMBREADO EN 2D

Con el fin de estimar el índice de sombreado a lo largo del día sobre el área de cultivo, se procedió a realizar un estudio de proyección de sombras en 2D. Para este estudio resulta necesario conocer la posición del sol en la bóveda celeste, el cual puede estimarse para cualquier momento del día utilizando como referencias el ángulo cenital (θ_z) o la altura solar (α). Tal como se muestra en la Figura 17, el ángulo cenital está definido por el ángulo formado entre el cenit local y la línea al sol; es decir, el rayo que conecta al sol con el origen del plano horizontal. Por su parte, la altura solar es el ángulo resultante entre el plano horizontal y la línea del sol; es decir, el complemento del ángulo cenital.

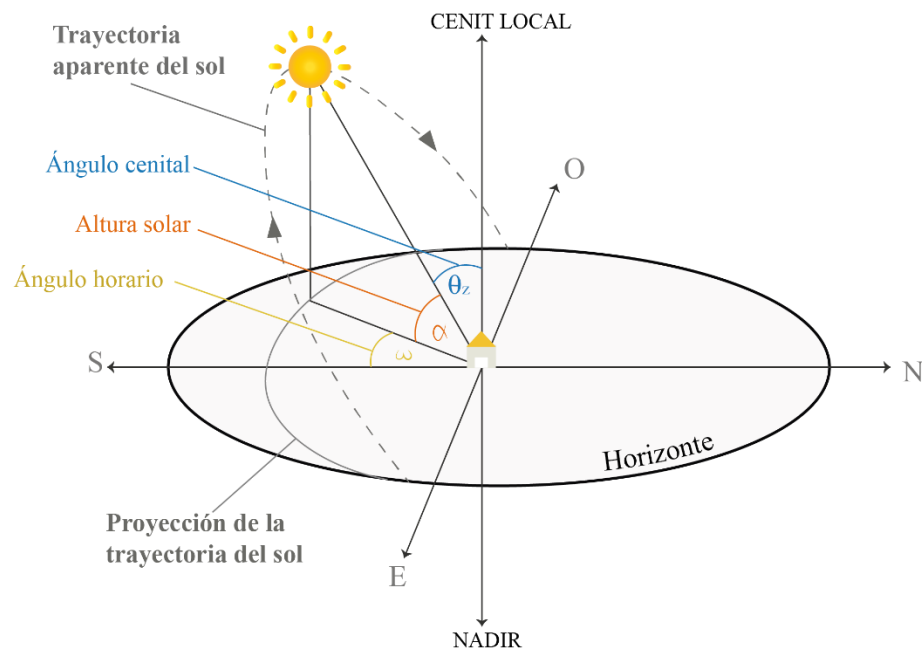


Figura 17. Esquematación de ángulos que definen la posición del sol.

Estos ángulos dependen de los movimientos de traslación de la tierra y la rotación sobre su propio eje. El movimiento de traslación, que es el cambio de la posición de la tierra sobre su órbita alrededor del sol, tiene un impacto directo sobre la declinación solar (δ). Este ángulo cambia a lo largo de todo el año, variando desde -23.45° hasta $+23.45^\circ$, teniendo en estos extremos los solsticios, mientras que los equinoccios suceden cuando la

declinación es igual a cero (ver Figura 18). Sumado a esto, la posición aparente del sol en el cielo se ve afectada por la hora del día, debido a la rotación de la tierra sobre su propio eje. Representado por el ángulo horario (ω), este cambia aproximadamente un grado cada 4 minutos.

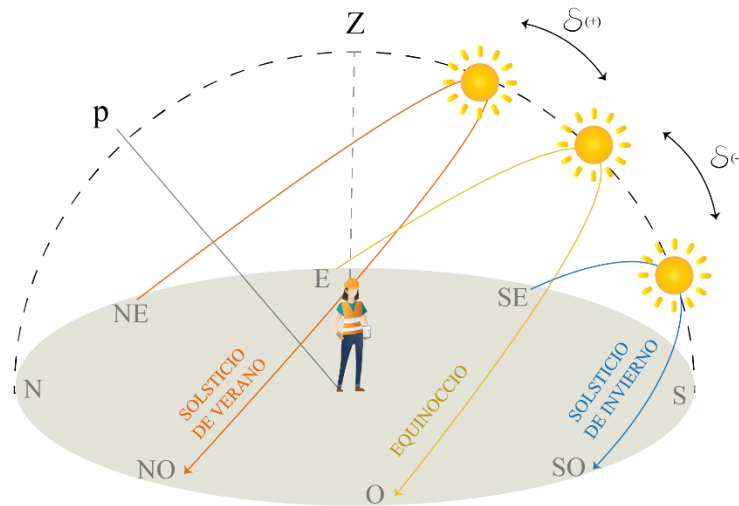


Figura 18. Esquematación de la órbita solar aparente durante los solsticios y equinoccios.

Para el hemisferio norte (en el cual se encuentra el sitio de interés) puede predecirse que durante el solsticio de verano será el día del año cuando el sol tendrá una mayor duración sobre el horizonte, a la vez que los cultivos estarán más expuestos al estrés térmico. Por el contrario, puede visualizarse que, durante el solsticio de invierno, se tendrá una menor duración del sol en la bóveda celeste y bajas temperaturas. Sumado a esto, para el caso de los equinoccios, se tendrá una duración intermedia de horas de luz solar comparada con los solsticios, mientras que las temperaturas serán moderadas.

Con el fin de observar el desplazamiento de sombra y conocer el índice de sombreado a lo largo del año, se procedió a realizar una proyección de sombras en 2D durante el medio día solar para los cuatro puntos de interés mencionados anteriormente (solsticio de verano, equinoccio de otoño/primavera y solsticio de invierno). Para este ejercicio fue necesario determinar el ángulo de declinación solar para los días de interés, para lo cual se utilizó la Ec. (6) (Duffie & Beckman, 2013).

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (6)$$

Empleando esta expresión, donde n representa el número de día del año, se obtuvo para el solsticio de verano (caso 1), el solsticio de invierno (caso 2) y los equinoccios (caso 3) un ángulo de declinación solar de 23.45° , -23.45° y 0° , respectivamente. Una vez conocidos estos ángulos, se procedió a calcular el ángulo cenital para cada uno de estos casos empleando la Ec. (7), para el cual ϕ representa la latitud del lugar.

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \operatorname{sen}\phi\operatorname{sen}\delta \quad (7)$$

Por simplicidad se consideró una latitud de 29° para Punta Chueca y El Desemboque. Asimismo, un ángulo horario (ω) igual a 0° , ya que este estudio considera la posición del sol durante el medio día solar. De esta manera, para el solsticio de verano, solsticio de invierno y los equinoccios, el ángulo cenital (θ_z) obtenido resultó ser de aproximadamente 6° , 53° y 30° , respectivamente. Con esta información se procedió a realizar una proyección de rayos con el fin de determinar la longitud de la sombra proyectada.

Como se muestra en las Figuras 19, 20 y 21, L representa la sombra proyectada verticalmente, asumiendo la posición del sol en el cenit (lograble en latitudes cercanas al ecuador). Adicionalmente, L_2 es el desplazamiento de la sombra en el área de cultivo; es decir que queda expuesta a la irradiación solar directa, mientras L_3 representa la longitud que aún permanece sombreada del área de cultivo.

Es importante mencionar que para este ejercicio el área de cultivo se localiza justo debajo de los módulos FV, por lo que su longitud corresponde a L y su profundidad dependerá de las dimensiones que tenga el arreglo FV.

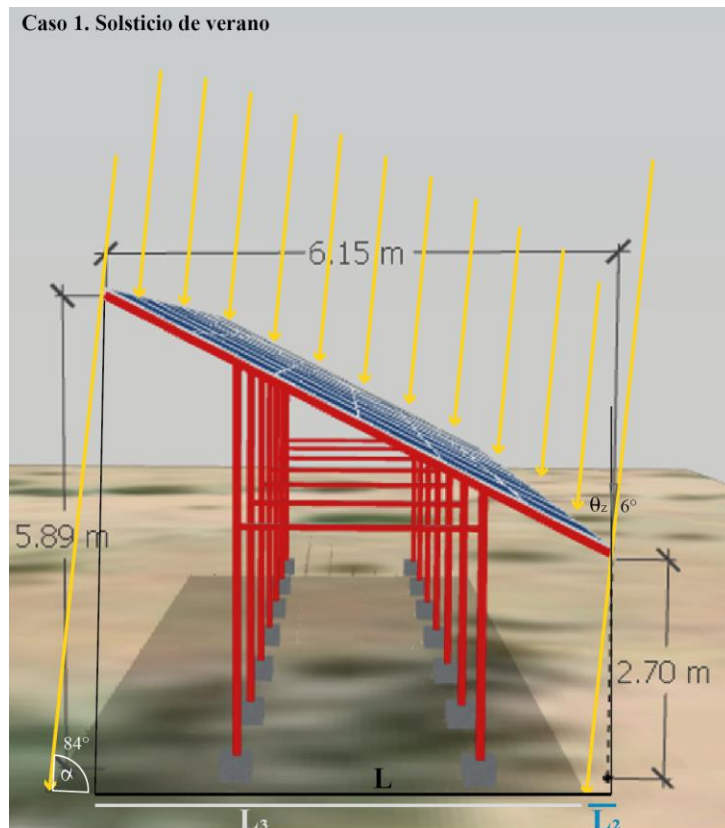


Figura 19. Proyección de rayos de sol en solsticio de verano (caso 1).

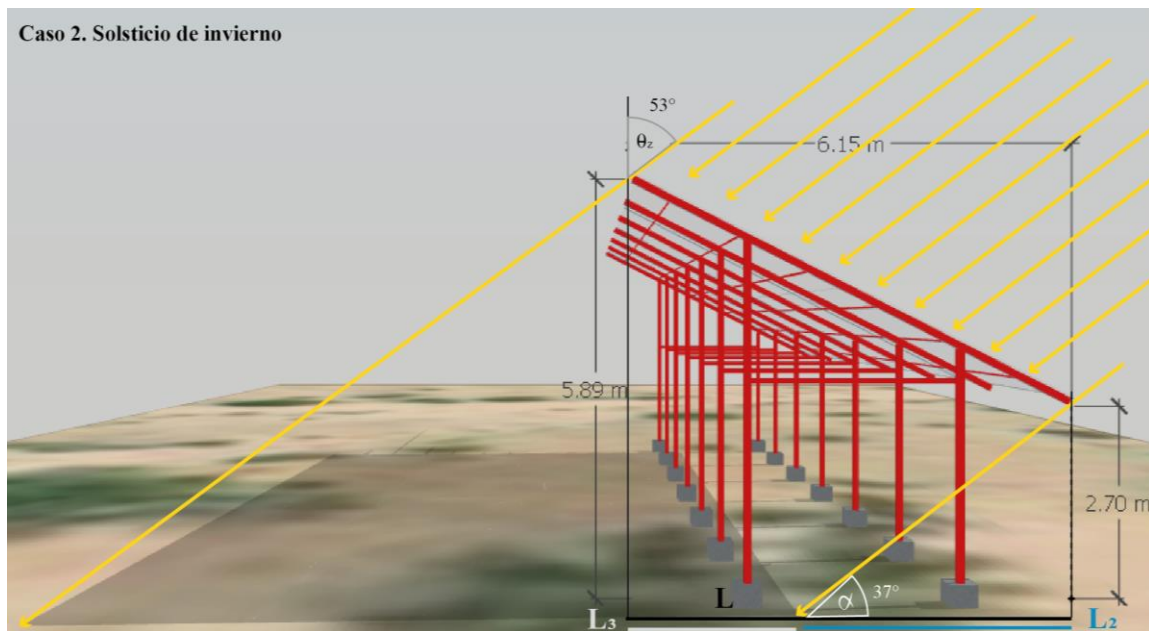


Figura 20. Proyección de rayos de sol en solsticio de invierno (caso 2).

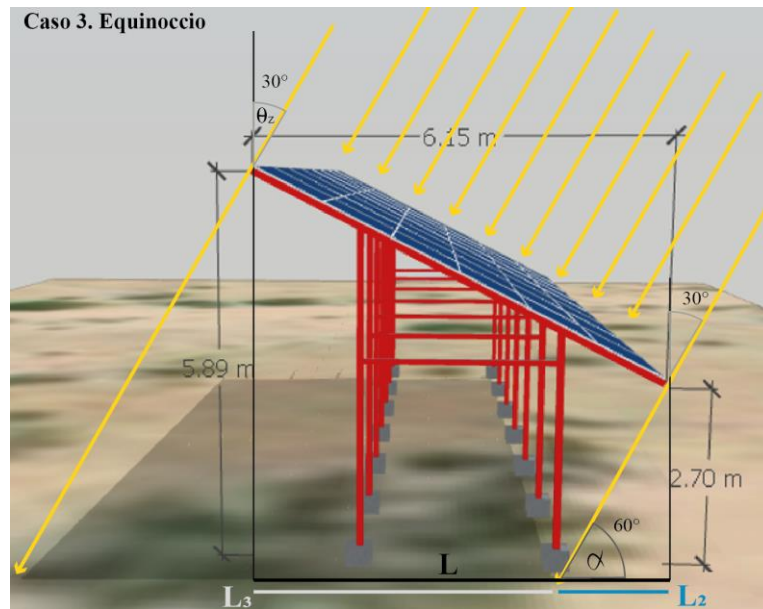


Figura 21. Proyección de rayos de sol durante los equinoccios (caso 3).

Para calcular la longitud del desplazamiento de sombra (L_2) se empleó la Ec. (8). Donde h_{FV} representa la distancia entre la parte inferior del arreglo FV y el nivel del suelo.

$$L_2 = h_{FV} \tan(\theta_z) \quad (8)$$

Usando esta expresión se obtuvo una longitud de desplazamiento de sombra al medio día solar de aproximadamente 0.2 m, 3.6 m y 1.5 m para el solsticio de verano, solsticio de invierno los equinoccios, respectivamente. Posteriormente, para obtener la longitud de la sección sombreada (L_3) dentro del área de cultivo (L), se hizo uso de la Ec. (9).

$$L_3 = L - L_2 \quad (9)$$

De esta forma, para una altura del arreglo FV de 2.7 m, se obtuvo que la longitud de la sección sombreada debajo de los módulos FV al medio día solar para el solsticio de verano, solsticio de invierno y los equinoccios, es de aproximadamente 5.9 m, 2.6 m y 4.6 m, respectivamente. Finalmente, para determinar el índice de sombreado (I_s), tal como se muestra en la Ec. (10), simplemente se dividió la longitud de la sección sombreada (L_3) entre la longitud del área de cultivo (L).

$$I_s = \frac{L_3}{L} \quad (10)$$

Los resultados muestran que durante el mediodía solar en el solsticio de verano, se registra un índice de sombreado de 0.96, mientras que este valor es de 0.42 en el solsticio de invierno y de 0.75 en los equinoccios. Estos datos indican que aproximadamente el 96%, el 42% y el 75% de la superficie cultivada estará resguardada de la radiación solar directa durante estos puntos de interés, respectivamente. En la Tabla III se muestra un resumen de los cálculos realizados en esta subsección para facilitar observar el cambio en el índice de sombreado a lo largo del año.

Tabla III. Desplazamiento de sombra e índice de sombreado durante el medio día solar para distintas estaciones del año.

Caso	Dimensiones			Índice de Sombreado
	L Longitud del huerto	L_2 Sección expuesta	L_3 Sección sombreada	I_s
1 – Solsticio de verano	6.15 m	0.24 m	5.91 m	0.96
2 – Solsticio de invierno	6.15 m	3.59 m	2.56 m	0.42
3 – Equinoccios	6.15 m	1.51 m	4.64 m	0.75

Este estudio demostró la capacidad de los sistemas AV de proteger a los cultivos en regiones áridas de sufrir estrés térmico durante los meses cálidos, al mismo tiempo maximizar la irradiancia directa sobre ellos en los meses de bajas temperaturas y menor número de horas de luz solar.

Con el fin de visualizar el índice de sombreado ofrecido por los sistemas AV a lo largo de todo el año, se realizó el mismo ejercicio en una hoja de cálculo, tomando en cuenta el mediodía solar en cada día. Como puede observarse en la Figura 22, durante mayo, junio y julio, meses en los que se recibe la mayor irradiación solar del año, para la ubicación de interés se tiene un índice de sombreado superior al 90%.

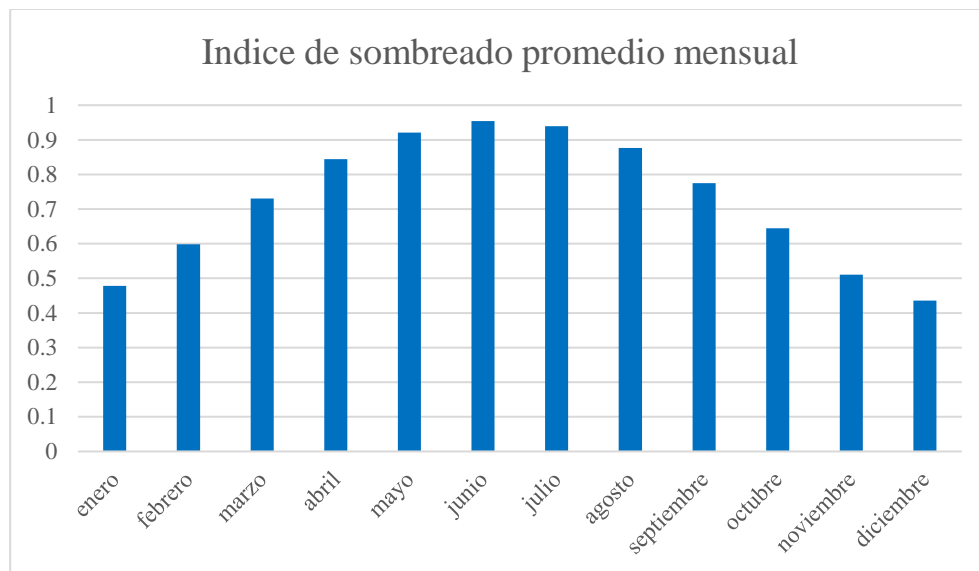


Figura 22. Índice de sombreado promedio para el medio día solar en los diferentes meses del año.

Adicionalmente, utilizando esta misma hoja de cálculo para cada hora y día del año, se estimó que los sistemas AV en ambas localidades son capaces de ofrecer aproximadamente 2,863 horas de sombra al año. Tomando en cuenta que las horas de luz solar directa en la región son aproximadamente 3,866 horas al año (Climate Data, 2023), se estimó un índice de sombreado total anual promedio de 0.74 durante el día.

3.3.2. Estudio de sombreado en 3D

Con el fin de realizar una proyección de sombras para las diferentes horas del día y diferentes estaciones del año, se procedió a importar los modelos 3D construidos de ambos sistemas FV en la plataforma de uso libre *3D Sun-Path* de A. Marsh (2022). Para este estudio nuevamente se utilizaron los solsticios y equinoccios como puntos de interés, ya que estos demarcan los límites y la posición intermedia de la órbita solar aparente, respectivamente (ver Figuras 23 y 24).

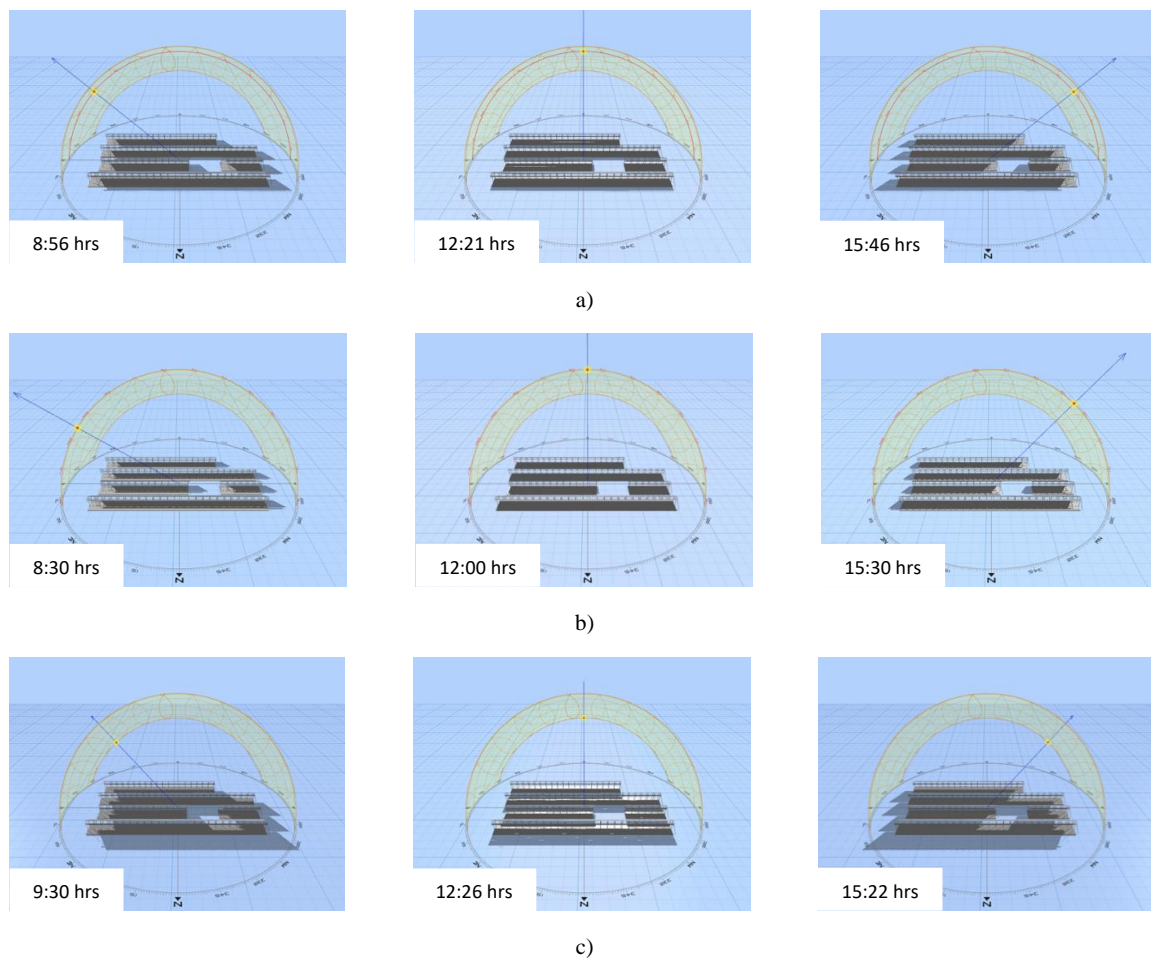


Figura 23. Estudio de sombreado del Parque FV en Punta Chueca durante (a) el equinoccio de otoño, (b) el solsticio de verano y (c) el solsticio de invierno.

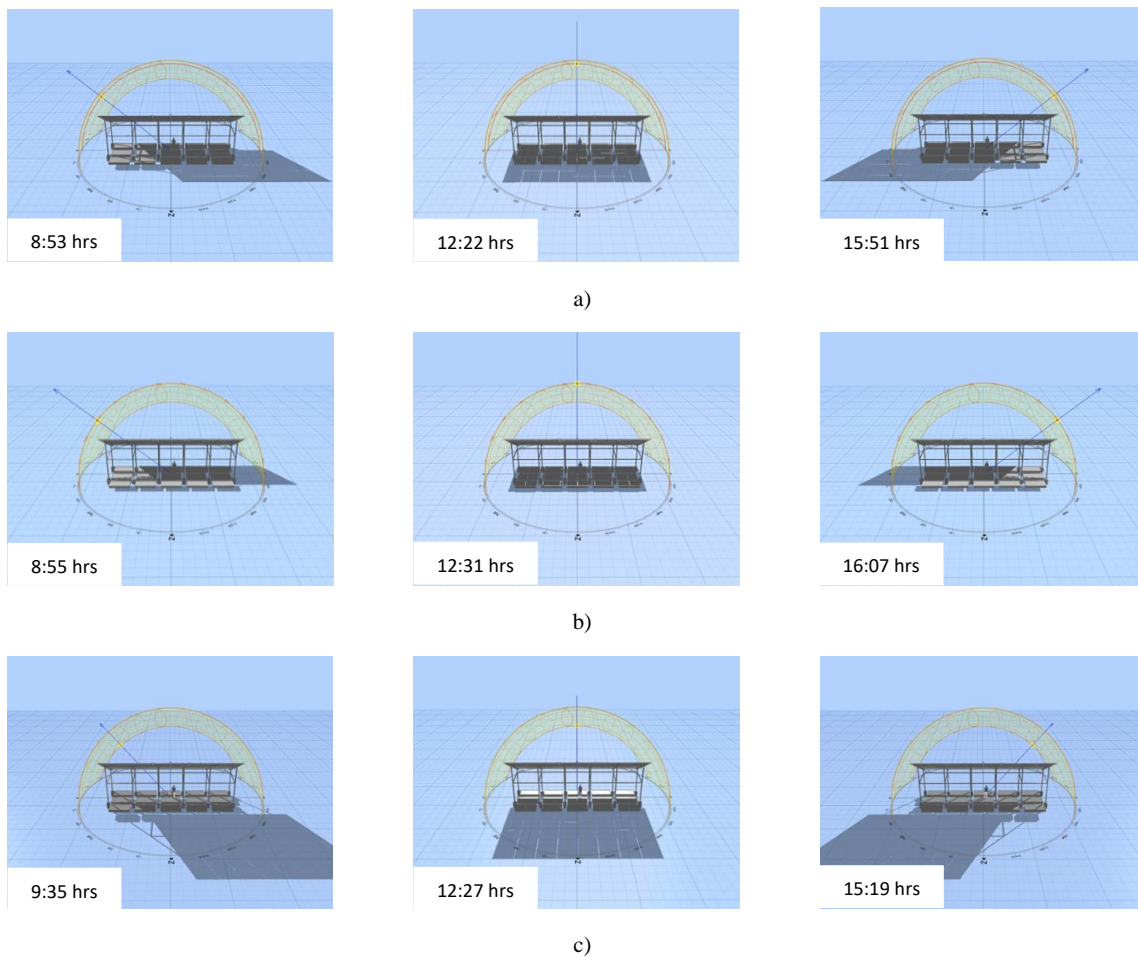


Figura 24. Estudio de sombreado del Sistema FV en El Desemboque durante (a) el equinoccio de otoño, (b) el solsticio de verano y (c) el solsticio de invierno.

Es importante mencionar que para este análisis de sombras se consideraron como límites aproximadamente tres horas y media antes y después del mediodía solar, ya que durante ese intervalo se tienen las horas solares pico promedio anuales para ambas localidades.

El área efectiva de cultivo se delimitó a la región totalmente sombreada durante el medio día solar en el solsticio de verano con el fin de maximizar la protección de los cultivos de la radiación solar directa en los días más largos del año. De esta manera, el área sombreada obtenida para Punta Chueca y El Desemboque fue de 1,897 m² y 43 m², respectivamente. Este estudio permitió observar también que durante el solsticio de invierno, cuando las plantas requieren luz solar directa, esta logra llegar a una gran parte del área de cultivo.

3.4. SELECCIÓN DEL CULTIVO DE ESTUDIO

Finalmente, de una lista de cultivos potenciales para huertos AV propuesta por expertos (Nabhan & Ruiz, 2022), se eligió al chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) como cultivo de prueba (ver Figura 25). Este cultivo se seleccionó debido a que es una especie endémica, tiene un uso popular como condimento a nivel regional y tiene un alto valor comercial. Además, esta planta es adaptable a la sombra ya que crece de forma natural bajo la protección de árboles en sitios montañosos, a los márgenes de arroyos y cañones (Araiza et al., 2011; Nabhan, 1985).

“La planta vive en lugares serranos, pues depende de una temperatura entre 15 y 30 °C, luz (fotoperiodo de 14 horas oscuridad y 10 horas luz), humedad relativa entre 75-100%, y, sobre todo, que se encuentra distribuida bajo la sombra de árboles y arbustos.” (Villalón et al., 2003).



Figura 25. (a) Fruto de chiltepín (Riordan et al., 2021) y (b) planta de chiltepín (créditos de imagen: Erin C. Riordan).

Adicionalmente, durante una entrevista con un experto productor de chiltepín (G. Martínez, comunicación personal, 30 de noviembre de 2021) se obtuvo información detallada acerca de los cuidados para este cultivo a lo largo de todo el proceso de producción. Entre la información relevante para esta investigación destacan su resistencia a la sombra, su bajo consumo de agua y su capacidad de producción de forma silvestre y en modo industrial. Estos parámetros, incluyendo sus cuidados y otros aspectos técnico-económicos, se detallan en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE COSTO-BENEFICIO DE LOS HUERTOS AV COMUNITARIOS

Para el análisis de costo-beneficio de los huertos comunitarios en ambas localidades, se construyó una hoja de cálculo en la que se evaluaron la producción de energía, el consumo de agua y la capacidad de producción de alimentos. El análisis de cada uno de estos elementos se detalla a continuación. Para simplificar este análisis de costo-beneficio, en la Tabla IV se muestran los datos más relevantes en temas de energía, agua y alimentación; así como su correspondiente valor económico cuando este aplique.

4.1. PRODUCCIÓN DE ALIMENTO

Como se mencionó anteriormente, el área cultivable de ambas localidades se determinó calculando el área de sombra proyectada al medio día solar durante el solsticio de verano. Este criterio de diseño se empleó con el fin de proteger a los cultivos en el que día que se tiene la mayor radiación solar directa del año, siendo 1,897 m² y 43 m² para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

Posteriormente, para el espaciamiento de plantas se consideró la opinión de un experto productor de chiltepín (G. Martínez, comunicación personal, 30 de noviembre de 2021). De esta manera el espaciamiento entre planta y planta utilizado en este cálculo fue de 0.5 m a lo largo de las filas y 1 m entre fila y fila; lo que resulta en una densidad de 0.5 plantas por m². Seguido a esto, el número de plantas a cultivar se determinó multiplicando el valor de la densidad de plantas por el área cultivable de cada huerto, dando como resultado 3,794 y 86 unidades para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

4.1.1. Producción de alimento en modo industrial

Tomando como referencia los datos provistos por el experto productor de chiltepín, se tiene que en modo de producción industrial cada planta puede producir suficientes frutos como para llenar 20 envases de un litro por año.

De esta manera, asumiendo una producción uniforme por todas las plantas y considerando el precio promedio del chiltepín en el mercado de 400 MXN por envase de 1 litro, los ingresos por ventas de este producto se estiman en 30,353,000 MXN y 688,000 MXN por año para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

Cabe mencionar que para la producción industrial de chiltepín se requiere de cuidados como fertilización, riego controlado y control de plagas; los cuales tienen un costo asociado. Para el proceso de fertilización, el experto mencionó utilizar “*Biofer*”, un fertilizante de tipo orgánico que tiene un valor comercial de 100 MXN por litro. La dosificación sugerida por el experto es de 4 L de este producto por hectárea por semana. Teniendo en cuenta estos mismos cuidados y el área de los huertos AV, se estimó una dosificación de 760 mL y 17 mL por semana de fertilizante orgánico, los cuales tendrían un costo de 3,945.8 MXN y 89.4 MXN por año para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

Posteriormente, el experto mencionó que las plantas de chiltepín en ambientes controlados y en modalidad de producción industrial requieren riego 1 vez por semana, suministrando entre 2 L y 5 L de agua por cada planta. Asumiendo un consumo promedio de 3.5 L por semana por planta, se estimó un volumen consumido de agua anual de 690.5 y 15.7 m³ de agua para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

Es importante mencionar que actualmente no existe un esquema de cobro por consumo de agua en Punta Chueca y El Desemboque. Sin embargo, considerando que en un futuro se implemente una tarifa de agua similar a la de la ciudad de Hermosillo (de 15.4 MXN por m³) se estima un gasto potencial anual de 10,608.7 MXN y 240.47 MXN, para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente. Los gastos adicionales por mantenimiento se estimaron cercanos al 3% del costo capital del proyecto AV, resultando en un valor de

1,058,880 MXN y 24,000.00 MXN por año, para Punta Chueca y El Desemboque respectivamente.

De esta manera, tal como se muestra en la Tabla IV, el balance de ingresos y gastos anuales da como resultado un ingreso neto de 29,278,565.5 MXN y 663,670.09 MXN para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente. Como puede apreciarse, la conversión de un sistema FV en AV ofrece enormes ventajas económicas.

4.1.2. Producción de alimento en modo silvestre

De acuerdo con la información provista por el productor experto, en modo silvestre la planta de chiltepín se cuida sola y da fruto una vez al año, mientras que en ambientes controlados y con nutrición orgánica la planta puede tener diez ciclos de producción en el año. De esta manera, se estima que en modo silvestre cada planta de chiltepín producirá suficientes frutos para llenar 2 envases de un litro por año.

Asumiendo nuevamente una producción uniforme por todas las plantas y considerando el precio del chiltepín en 400 MXN por envase de 1 L, los ingresos por ventas de este producto se estiman en 3,035,200 MXN y 68,800 MXN por año para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

En este modo de producción no se considera gastos en consumo de agua, ni fertilizante. Los gastos de mantenimiento se estiman a un décimo de su valor en modalidad de producción industrial, obteniendo como resultado un gasto en mantenimiento aproximado de 105,888 MXN y 2,400.00 MXN por año para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

Finalmente, el balance de ingresos y gastos anuales da como resultado un ingreso neto de 2,929,312 MXN y 66,400 MXN para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente. Nuevamente se puede apreciar el gran potencial económico que implica la conversión de un sistema FV en AV, inclusive cuando la producción de alimento se realiza en modalidad silvestre.

4.2. CONSUMO DE AGUA

Tomando como referencia un consumo de agua de 690.5 m^3 y 15.7 m^3 al año, se obtuvo un volumen de 1,891.8 y 42.9 litros a sustraer por día de la planta desalinizadora de Punta Chueca y del pozo de El Desemboque, respectivamente. Con estos valores se puede apreciar que el consumo de agua en el caso de Punta Chueca equivale al consumo diario de 10 viviendas aproximadamente. Sin embargo, el huerto AV es capaz de proveer alimento para 39 viviendas. Para el caso de El Desemboque el consumo de agua es marginal ya que solo ocupa un cuarto del consumo de una vivienda, mientras que es capaz de proveer alimento para 1 familia de 4 personas.

Por otro lado, es importante mencionar que en el caso de Punta Chueca el agua potable proviene de una planta desalinizadora que tiene una capacidad de recuperación del 40%; es decir, por cada litro de agua potable que se usa en el huerto, 1.5 litros de residuos salinos son descargados al mar. Tal como se muestra en la Tabla IV, la descarga de salmuera al mar por la producción de chiltepín (cultivo de bajo consumo de agua) en modo industrial equivaldría a 2.8 m^3 por día ó $1,035.8 \text{ m}^3$ por año. De esta manera, es esencial un uso óptimo del agua para minimizar el impacto ambiental sobre el ecosistema marino local.

4.3. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, las localidades de Punta Chueca y El Desemboque cuentan con sistemas FV instalados de capacidades de 386 kWp y 17.5 kWp. Utilizando la herramienta PVWatts, e introduciendo los distintos parámetros de los módulos FV y la ubicación geográfica de ambas localidades, se estimó que ambos sistemas son capaces de generar 702,613 kWh y 31,980 kWh al año, respectivamente.

Adicionalmente, de acuerdo con las estimaciones realizadas en el Capítulo 3, en el caso de Punta Chueca, considerando todas las cargas eléctricas para la producción de 150 m^3 de agua potable a partir de agua de mar, se obtuvo un consumo energético aproximado de 839.9 kWh diarios. En el caso de El Desemboque, se estimó un consumo de energía de

56.1 kWh diarios, al consultar los recibos de consumo eléctrico de la CFE. Con estos valores de consumo energético, en ese mismo capítulo también se estimó una capacidad FV requerida, resultando en 180.4 kWp y 12.2 kWp, haciendo visible que los sistemas FV instalados en la planta desalinizadora de Punta Chueca y pozo de El Desemboque están sobredimensionados en un 114% y 43%, respectivamente.

Es importante mencionar que la tarifa aplicada a la planta desalinizadora de Punta Chueca es la GDBT (gran demanda baja tensión), mientras que en El Desemboque es la PDBT (pequeña demanda baja tensión). Por esta razón, existe a una diferencia significativa en el costo por kWh de energía consumido en ambas localidades.

Con esta información el gasto anual de energía se estimó multiplicando el consumo anual por el precio medio de energía mencionado en el Capítulo 3, dando como resultado 35,937.41 y 5,284.1 MXN para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente. De esta manera, los ahorros anuales esperados por la energía generada por los módulos FV es de aproximadamente 431,249 MXN y 63,409.3 MXN para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque.

Posteriormente, el costo por Watt instalado de los sistemas FV se estimó en 2 USD (35 MXN) para ambas localidades. Cabe mencionar que este valor supera moderadamente a su precio estándar en el mercado, debido a que se trata de un proyecto en zonas apartadas. Dichos proyectos involucran gastos adicionales tales como transporte, logística y el traslado de maquinaria al sitio del proyecto. Por consiguiente, el valor del proyecto FV se obtuvo multiplicando la capacidad pico de los sistemas FV por el valor de Watt instalado, resultando en un costo capital de 15,826,000 MX y 717,500 MXN para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente. Para la estimación del costo capital de los sistemas AV se consideró una inversión adicional del 5%, obteniendo un valor final de 16,617,300 MXN y 753,375 MXN para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente.

4.4. RETORNO DE INVERSIÓN SIMPLE

Tal como se muestra en la Tabla IV, en el caso que solo se pretenda utilizar los sistemas FV para producción de electricidad, el tiempo de retorno de inversión obtenido (dividiendo el costo capital de dichos sistemas entre el ahorro anual de energía descritos anteriormente) resultaría en 38.5 y 11.9 años para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente.

Sin embargo, si se adaptan estos sistemas para producción agrícola, teniendo como actividad principal la producción de chiltepín en modo silvestre, el tiempo de retorno de inversión obtenido dividiendo el costo capital de dichos sistemas AV entre el ahorro anual de energía más los ingresos por producción de alimentos descritos anteriormente, es de aproximadamente 4.9 y 5.8 años para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente.

Finalmente, si la producción de chiltepín se realiza en modo industrial, el tiempo de retorno de inversión obtenido dividiendo el costo capital de dichos sistemas AV entre el ahorro anual de energía más los ingresos por producción de alimentos descritos anteriormente, es de aproximadamente 0.6 y 1 años para la planta desalinizadora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque, respectivamente.

Tabla IV. Resultados de análisis de balance de producción/consumo de alimento, agua y energía para los sistemas AV comunitarios propuestos.

PRODUCCIÓN DE ALIMENTO		
	Punta Chueca	El Desemboque
Área cultivable (m ²)	1,897	43
Densidad de plantas (#/m ²)	0.5	0.5
Número de plantas posible en huerto A-FV (#)	3,794	86
Precio de venta de chiltepín (MXN/L)	400	400
Producción en modo industrial		
Producción (L/planta/año)	20	20
Ingresos por ventas de Chiltepín (MXN/año)	30,352,000	688,000
Fertilizante orgánico (L/m ² /semana)	0.8	17 x 10 ⁻³
Gasto en fertilizante (MXN/año)	3,945.8	89.4
Consumo de agua (L/planta/semana)	3.5	3.5
Consumo de agua (m ³ /año)	690.5	15.7
Precio de agua potable (MXN/m ³)	15.4	15.4
Gasto en agua potable (MXN/año)	10,608.7	240.5
Mantenimiento del sistema A-FV (\$/año)	1,058,880	24,000
Balance (MXN/año)	29,278,565.5	663,670.1
Producción en modo silvestre		
Producción silvestre (L/planta/año)	2	2
Ingresos por ventas de Chiltepín (MXN/año)	3,035,200	68,800
Gasto en fertilizante (MXN/año)	0	0
Gasto en agua (MXN/año)	0	0
Mantenimiento del sistema A-FV (MXN/año)	105,888	2,400
Balance (MXN/año)	2,929,312	66,400
CONSUMO DE AGUA		
	Punta Chueca	El Desemboque
Consumo diario (L/día)	1,891.8	42.9
Recuperación de Desalinizadora (%)	0.40	N/A
Producción de Salmuera (L/día)	2,837	N/A
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		
	Punta Chueca	El Desemboque
Tamaño del Sistema FV (kWp)	386	17.5
Producción anual (kWh)	702,613	31,980
Precio medio por tarifa aplicable (MXN/kWh)	1.4	3.1
Cobertura de consumo eléctrico	214%	143%
Gasto aproximado en energía (MXN/mes)	35,937.4	5,284.1
Ahorro aproximado (MXN/año)	431,248.9	63,409.3
Costo estimado por Watt instalado (USD)	2	2
Costo estimado de sistema FV (MXN)	15,826,000	717,500
Costo estimado de huerto (MXN)	791,300	35,875
Costo estimado de sistema A-FV (MXN)	16,617,300	753,375
Retorno de inversión simple		
Solo produciendo energía (años)	38.5	11.9
Energía y producción silvestre (años)	4.9	5.8
Energía y producción industrial (años)	0.6	1.0

4.5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos del modelado y análisis de costo-beneficio para los huertos AV propuestos, muestran que su implementación ofrece una solución altamente rentable para sus usuarios en ambas localidades. Como puede observarse en la Tabla IV, la producción agrícola reduce significativamente su retorno de inversión, siendo que su conversión de FV a AV solo implica una inversión adicional de aproximadamente un 5% de su costo capital inicial. Sorprendentemente, puede apreciarse que inclusive cuando la actividad agrícola se lleva a cabo en modalidad silvestre, es decir, con una sola cosecha al año y mínimos cuidados, el tiempo de retorno de inversión se reduce significativamente con cultivos de alto valor en el mercado.

Por otra parte, este estudio demostró que el cultivo de plantas nativas y propias de climas áridos prometen un uso responsable del recurso hídrico. Esto es particularmente deseable para la localidad de Punta Chueca, donde este proviene en su totalidad de una planta desalinizadora. En este sitio, por cada litro de agua potable producida, se genera un litro y medio de salmuera que actualmente es devuelto al mar, lo cual puede afectar a mediano y largo plazo al ecosistema marino local. El uso eficiente de agua ofrece ventajas también en términos de energía, dado que la provisión de este recurso requiere de una cantidad sustancial de energía, particularmente por la planta desalinizadora.

Sumado a esto, como se muestra en la Tabla IV, en esta investigación pudo observarse que el ahorro de energía por la implementación de módulos FV para la provisión de agua en ambas localidades es sustancial, cubriendo por completo el requerimiento energético de ambas localidades. En el caso de Punta Chueca, sin los sistemas FV, el costo del agua potable sería prohibitivo sin algún tipo de subsidio, mientras que, para El Desemboque, el ahorro generado es crucial para facilitar el pago oportuno del servicio eléctrico del pozo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

A pesar de que actualmente existen distintas configuraciones, los sistemas AV consisten esencialmente en realizar actividades agrícolas debajo de estructuras que soportan sistemas FV, para la producción de energía eléctrica. Como se observó en la literatura, la principal ventaja de los sistemas AV es su doble aprovechamiento del suelo y por consiguiente un aumento en la productividad de la tierra; es decir, energía limpia y alimento al mismo tiempo. Esta tecnología ha sido probada principalmente en latitudes altas, con climas templados, donde los resultados han sido exitosos, a pesar de que existe una relativa competencia entre los cultivos y los módulos FV por el acceso a la radiación solar directa. En contraste, la limitada literatura encontrada a la fecha coincide en que la implementación de sistemas AV en tierras áridas ofrece múltiples beneficios a lo largo de las tres dimensiones del nexo agua-energía-alimento. Entre estos beneficios destacan: una reducción en el estrés térmico para los cultivos y por consiguiente un menor consumo de agua, así como una ligeramente menor temperatura de operación para los módulos FV, lo que se traduce en un aumento (cercano al 1%) de su eficiencia.

La realización de este trabajo permitió observar de primera mano estos beneficios. Primeramente, en términos de energía, pudo observarse que el uso de sistemas FV ofrece ahorros sustanciales en las facturas eléctricas para el suministro de agua en ambas localidades. Esto minimiza las posibilidades de endeudamiento, al mismo tiempo de mantener bajos los costos de producción de agua potable, especialmente cuando esta se obtiene mediante desalinización. Adicionalmente, durante el ejercicio de dimensionamiento se observó que, la capacidad FV instalada en Punta Chueca y El Desemboque está sobredimensionada en un 114% y 43%, respectivamente. Esto abre la posibilidad de futuras ampliaciones en la capacidad de producción de agua potable y/o el uso del excedente de energía para el desarrollo de otras actividades productivas. Por otra parte, el ejercicio de diseño para la conversión de estos sistemas FV a AV permitió

visualizar una exponenciación de los beneficios que ofrecen los sistemas FV con adaptaciones relativamente simples y poco costosas.

El análisis de sombreado en 2D realizado en este trabajo permitió observar la capacidad de los huertos AV de ofrecer una protección a los cultivos contra el estrés térmico. El índice de sombreado observado en los meses cálidos superó al 90% durante el medio día solar, mientras que el promedio anual de horas de sombreado estimado fue del 74%. Sumado a esto, mediante este estudio se observó que el índice de sombreado es bajo en los meses de clima frío y pocas horas de luz, por lo que se visualiza la posibilidad de producción de alimentos a lo largo de todo el año. Esto es particularmente beneficioso para especies que requieran sombra en verano e irradiancia solar directa en invierno.

A pesar de que este trabajo se enfocó en la producción de chiltepín como cultivo de prueba, de manera general, se observó durante esta investigación (que además incluyó entrevistas con expertos) que existe una amplia variedad de especies de plantas que pueden cultivarse en sistemas AV. Esto abre la posibilidad de que las familias en localidades apartadas puedan producir una fracción considerable de sus alimentos frescos, los cuales son generalmente escasos y costosos localmente. Igualmente, los sistemas AV tienen un alto potencial para la producción de plantas medicinales, tanto para autoconsumo, como para su venta. En combinación, esto se traduciría en una mejor nutrición, una mejor salud y posibilidades de obtener ingresos adicionales significativos para las familias usuarias de los huertos AV comunitarios.

Por otra parte, el estudio de costo-beneficio permitió observar la enorme reducción en el tiempo de inversión para los sistemas FV que ofrece su conversión en sistemas AV. Esto abre la posibilidad de que más localidades del país en condiciones de inseguridad energética, hídrica y alimentaria, y con financiamiento limitado, puedan revertir dicha situación mediante la implementación de sistemas AV, inclusive cuando aún no cuenten con sistemas FV. Además, se visualiza que un reducido retorno de inversión permitiría el escalamiento de los sistemas AV para una producción agrícola a gran escala, lo que aumentaría significativamente los ingresos y por consiguiente las condiciones de vida en dichas localidades.

Cabe mencionar que este estudio consideró el cultivo de una especie endémica y propia de ambientes áridos, por lo que pudo observarse un consumo reducido de agua. Sin embargo, el cultivo de otras especies no endémicas de ecosistemas áridos puede fácilmente convertir a los huertos AV en ávidos consumidores del escaso recurso hídrico. Para estos casos es altamente recomendado el uso de medidas de ahorro de agua, tales como el riego por goteo.

Además, el cultivo estudiado en este trabajo es una especie tolerante a la sombra, por lo que la producción de otras especies menos tolerantes a la sombra requerirá modificaciones en el diseño de los huertos AV, para que estos ofrezcan las condiciones de iluminación y temperatura que requieren las plantas. Sumado a esto, este estudio preliminar consideró un cultivo de alto valor en el mercado y asumió un mercado dispuesto a adquirir toda la producción agrícola. En la práctica será necesario considerar huertos comunitarios con policultivos, donde además entrarán en juego otros factores determinantes como los ambientales, económicos, sociales, etc.

Los sistemas AV no solo prometen prosperidad para las tierras áridas, sino para la población mundial en general. La reducción en el consumo de agua que ofrecen los sistemas AV, combinada con prácticas agrícolas eficientes, representa una alternativa sustentable para alimentar a una población global en constante crecimiento. Por otra parte, los sistemas AV ofrecen ser una herramienta ideal para aumentar la resiliencia de las prácticas agrícolas ante la variabilidad climática y mejorar las condiciones de trabajo para quienes se dedican a ellas. Finalmente, además de minimizar el conflicto por uso de suelo entre los sectores agrícola y energético, los sistemas AV los convierte en aliados estratégicos para propulsar la producción agrícola sustentable y la implementación de las energías limpias, particularmente en tierras áridas.

5.2. RECOMENDACIONES

Durante el proceso de diseño para la conversión de un sistema FV en AV, es necesario conocer la proyección de sombras de dicha instalación. Así mismo deben considerarse los requerimientos específicos de un huerto en el diseño de las estructuras que soportarán los módulos FV, en caso de que no hayan sido construidas aún.

En este trabajo se avanzó en resolver el estudio de sombreado en 2D, para condiciones de mediodía solar, es decir para observar su variación a lo largo de las distintas estaciones del año. En futuros trabajos de investigación se recomienda avanzar en el análisis de sombreado en 3D y considerar además de su variación estacional, su desplazamiento a lo largo de cada día.

Adicionalmente, se sugiere que en investigaciones futuras se propongan diseños que incluyan adaptaciones para la captación de agua de lluvia y así aumentar el volumen de agua potable disponible localmente. Así mismo, se propone que se realicen estudios de suelo en ambas localidades para identificar especies de cultivos con mayor facilidad de adaptabilidad a las condiciones locales.

Se recomienda también que en futuros proyectos AV en regiones áridas se explore la producción de policultivos. Finalmente, dado que los sistemas AV son una tecnología relativamente reciente, se considera importante dotar a los diseños propuestos en este trabajo de un sistema de monitoreo de variables meteorológicas que permitan estudiar la producción agrícola a lo largo de todo el año.

BIBLIOGRAFÍA

- Araiza Lizarde, N., Araiza Lizarde, E., & Martínez Martínez, J. G. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de Plántula de Chiltepín (*Capsicum annum* L variedad *glabriusculum*) en invernadero. *Revista colombiana de biotecnología*, 13(2), 170-175.
- Barnett E. & Mejía, J. (2022). Entrevista a fundadora de Huerto Socoaix y fundador de organización Color Tierra A.C. en Punta Chueca, Sonora, febrero 28 de 2022.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak A. K., Nabhan, G. P. & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.
- Bellini E. (2020). Giant agrivoltaic project in China. *PV Magazine*. Septiembre 3, 2020. Recuperado: Febrero 22 de 2023 de <https://www.pv-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/>
- Blust, K. (2021). After Five Weeks Without Water, Comcaac Community In Sonora Seeks Urgent Help, *Fronteras*. Recuperado: Febrero de 2023 de <https://fronterasdesk.org/content/1700139/after-five-weeks-without-water-comcaac-community-sonora-seeks-urgent-help#expanded>
- Burney, J., Woltering, L., Burke, M., Naylor, R., & Pasternak, D. (2010). Solar-powered drip irrigation enhances food security in the Sudano–Sahel. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(5), 1848-1853.
- Colin, J.A. (2022). Entrevista a ingeniero responsable de construcción de Sistema FV en pozo de Desemboque. DGE de la secretaría de Economía del Estado de Sonora en Hermosillo, Sonora, 4 de mayo de 2022.
- Climate Data. (2023). Portal de información climática. Recuperado: julio de 2023 de <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/sonora/hermosillo-3415/>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.

- Dubois, O. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: managing systems at risk. Earthscan.
- FAO. (2019). Escasez de agua: Uno de los mayores retos de nuestro tiempo. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado: 22 de marzo de 2019 de <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/>.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69.
- IRENA (2019), Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Mead, R., & Willey, R. (1980). The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Experimental agriculture*, 16(3), 217-228.
- Marsh, A. (2022). 3D Sun-Path. Herramienta para modelación de iluminación solar sobre modelos 3D. Recuperado: Junio de 2022 de <https://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>
- Martinez, G. (2021). Entrevista a ingeniero agrónomo experto en la producción de chiltepín. Instalaciones de la Universidad de Sonora en Hermosillo, Sonora, 30 de noviembre de 2021.
- Nabhan, G. & Ruiz, G. (2022). Entrevista a Dr. Gary Nabhan, investigador de la Universidad de Arizona e ingeniero Gerardo Ruiz, director de la organización Mezquite.org mediante videoconferencia, 9 de junio de 2022.
- Nabhan, G. 1985. "For the Bird: the Red-hot Mother of Chiles". En: *Gathering the Desert*. Tucson, Arizona, The University of Arizona Press, pp. 123-133.
- Randle-Boggis, R. J., Lara, E., Onyango, J., Temu, E. J., & Hartley, S. E. (2021, June). Agrivoltaics in East Africa: opportunities and challenges. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2361, No. 1, p. 090001). AIP Publishing LLC.
- Riordan, E. C., Renteria, R. R., Nabhan, G. P., Burgess, M. A., Filer, P., García, G. S., Ortega-Loroña, D., Parlin, J. M., Rockey, E. (2021). Desert foods for a resilient future.

- Steduto, P., Hoogeveen, J., Winpenny, J., & Burke, J. (2017). Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.
- Steher, H., Adelhardt N., Bingwa, B. & Wolf S. (2023). Unlocking the potential of agrovoltatics. *Rural* 21, 57, 28-32.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871.
- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer, U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, S., & Vollprecht, J. (2022). Agrivoltatics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. Fraunhofer ISE. Abril 2022. Recuperado: febrero 2023 de <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/APV-Guideline.pdf>
- UN. (2019). 2010–2020: UN Decade for Deserts and the Fight Against Desertification.
- Utrilla, E. (2022). Entrevista a ingeniero responsable de la construcción del parque fotovoltaico de la planta desalinizadora de Punta Chueca. Instalaciones de empresa Tivatech en Hermosillo, Sonora, 21 de abril de 2022.
- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M. & Christophe, A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied energy*, 206, 1495-1507.
- Villalón, H., T. Medina, J. M., Soto, L. A., Rodríguez, O., Pozo, M., Ramírez, F., Garza, R., López, A., R. López, L. y M. Lara.2003. Efecto de diferentes intensidades de luz en la producción de chile piquín (*Capsicum annum* L. var *aviculare*).*Revista Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León* (en prensa).
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 1-20.

ANEXO A

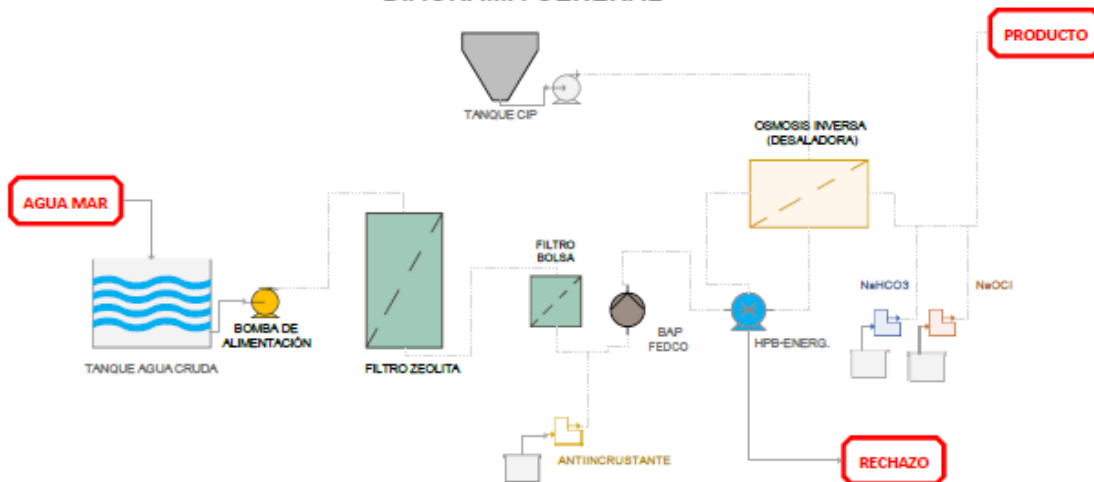
Ficha Técnica de Planta Desalinizadora de Punta Chueca

(Cortesía de Dr. Germán Eduardo Dévora Isiordia,

Instituto Tecnológico de Sonora)

El diseño contempla un suministro de una planta de RO Desalación y bombeo para alimentación a pre tratamiento a osmosis inversa, un pre-tratamiento compuesto por 2 filtros con media filtrante para remoción de partículas mayores a 5 micras, tanques 36" de diámetro x 72" altura , una planta de ósmosis inversa con capacidad de 150 m³/día de agua producto, con una calidad de agua menor a 400 mg/l.

DIAGRAMA GENERAL



Los parámetros de operación, tales como el porcentaje de recuperación, la calidad de permeado, la dosificación de producto químico, son aproximaciones que deberán ser validadas mediante análisis actuales del agua a tratar.

PRE-TRATAMIENTO

SKID DE BOMBEO: ALIMENTACIÓN Y RETROLAVADO DE FILTRO MULTIMEDIA

BOMBEO ALIMENTACIÓN MODULO DE OSMOSIS INVERSA			
FUNCIÓN			
ALIMENTACIÓN DE TREN DE FILTRACIÓN Y ÓSMOSIS INVERSA			
DISEÑO			
Flujo de Servicio	68.80 gpm 60 psi	Temperatura máxima	40 °C
Flujo BW	82.8 gpm	Recomendación	Succión Positiva
ALCANCE			
Cantidad de equipos	1 pieza		
Operación	Manual o Automatico, Seleccionado considerando flujo de retrolavado de filtros.		
COMPONENTES			
Bomba de Alimentación	1 pieza		
Modelo	ZC2		
Material	Aluminio/Bronce/Niquel, Descarga 2" x Succión 1 1/2"		
Motor	7.5 hp, 3F, 3500 rpm, 220/440v		
Variador de Frecuencia	1 Pieza, Aquavar		
Báse de Soporte	1 Pieza Acero Al Carbón/Pintura Epox.		

FILTRO ZEOLITA TURBIDEX

FILTRO TURBIDEX DE OPERACIÓN AUTOMÁTICA			
FUNCIÓN			
ELIMINAR SÓLIDOS SUSPENDIDOS MAYORES A 5 MICRAS			
DISEÑO			
Material de filtración	Zeolita filtrante	Flujo de operación	34.4 gpm
Altura de cama filtrante	36"	Flujo de retrolavado	82.8 gpm
Flujo por unidad de área	5-7 gpm/ft ²	Presión de operación	50 psi
Flux retrolavado	12 gpm/ft ²	Presión máxima	80 psi
Diferencial de presión	5 psi	Temperatura máxima	40 °C
ALCANCE			
Cantidad de filtros	1 pieza		
Operación	Automática		
COMPONENTES POR TANQUE			
Tanque	1 pieza		
Material	FRP		
interior	Polietileno de alta densidad		
Exterior	Fibra de vidrio		
Diámetro	36"		
Altura	72"		
Medio Filtrante	Zeolita Filtrante Turbidex		
Cantidad	20 ft ³		
Colector inferior	Conico Reforzado		
Material	PVDF		
Válvulas de operación	Clack WS2		
Manómetros de entrada y salida	2 piezas, Material : MONEL		
Transmisor de Presión	2 Pieza, Cuerpo de Titanio		

DESALADORA 150 MCD (ÓSMOSIS INVERSA)

OSMOSIS INVERSA DE OPERACIÓN AUTOMÁTICA			
FUNCIÓN			
DESMINERALIZACIÓN DE AGUA			
DISEÑO			
Tipo de agua alimentada	Agua de Mar	Recuperación	40%
Calidad de alimentación	36151 ppm SDT	Presión de alimentación	730 psi @ 25 °C
Calidad de permeado	<400 ppm SDT	Presión de rechazo	<40 Psi
Flujo de alimentación	70 gpm	Concentración máx. cloro Alimentación	0 ppm
Flujo de permeado O.I.	28 gpm	GFD Promedio	8 a 9
ALCANCE			
Cantidad de equipos	1 Módulo de Ósmosis Inversa		
Operación	AUTOMATICA		
COMPONENTES			
Sistema de Dosificación de Inhibidor (piezas)	1		
Bomba dosificadora	IWAKI con capacidad de hasta 0.3 GPH		
Tanque de día	30 galones, en polietileno		
Filtro Pulidor (piezas)	1		
Material	Polipropileno		
Modelo	Aqualine		
Cantidad y tamaño de cartuchos (piezas)	6.75" x 60"		
Retención	1 micra		
Bomba de Alta Presión	1 pieza, FEDCO		
Modelo	40 HP, 3 Fases, 220/440 Volts		
Material	Acero Inoxidable Duplex 2205		
Entrada y salida	Vitaulics, 3" de diámetro		
Recuperador de Energía	1 pieza, FEDCO		
Modelo	HPB-20		
Membranas	12		
Modelo	SWCS MAX		
Material	Poliamida		
Dimensiones	8" de diámetro por 40" de longitud		
Recipientes de Presión	3		
Modelo	80S100-4; fabricado en FRP. (1000 PSI)		

INSTRUMENTACIÓN (INCLUYE MONITOREO Y CONTROL REMOTO)		
Medidor de Flujo de Permeado	1 pieza, GF Signet	
Monitor	Tipo Ciego	
Sensor de Flujo	1 pieza, GF Signet	
Modelo	Tipo Ciego	
Medidor de Flujo de Alimentación	1 pieza, GF Signet	
Monitor	Tipo Ciego	
Sensor de Flujo	1 Pieza	
Medidor Ph Alimentación/Permeado	2 piezas, GF Signet	
Medidor Conductividad Permeado y Alim.	2 piezas, GF Signet	
Manómetros filtro pulidor	2 piezas, de 0-100 psi, Material: Monel	
Manómetro descarga BAP	2 pieza, 0-1000 psi, Material: Monel	
Manómetro de rechazo	2 pieza, 0-1000 psi, Material: Monel	
Manómetro de permeado	1 pieza, 0-100 psi, marca ASHCROFT	
MATERIALES		
Tubería antes de BAP	PVC cédula 80, 2, 1/2"	
Tubería después de BAP	Duplex 2205, 2, 1/2"	
Tubería de rechazo	Duplex 2205, 2"	
Tubería de permeado	PVC Cédula 80, 1/2"	
Patín soporte	Acero al carbón .	
TABLERO		
PLC	Allen Bradley	
Variador de frecuencia	1 Pieza, Marca Aquavar, Goulds	
Gabinete	NEMA 4 X, Incluye Panel View.	
ALARMAS Y SEÑALES		
• Señal de paro por baja presión en la succión de la bomba de alta presión		
• Señal visual o de paro por valor alto de SDT en el permeado.		
• Señal de paro por nivel alto en el tanque de agua permeada.		
CALIDAD DE AGUA ESPERADA		
Parámetro (ppm)	Alimentacion	Permeado
pH	6.8-7.5	5.5-6.5 Sin Pos-Tratamiento
SDT (ppm)	36151	<300 ppm SDT

EQUIPO DE LIMPIEZA QUÍMICA

EQUIPO DE LIMPIEZA PARA MODULO DE OSMOSIS INVERSA			
FUNCIÓN			
LIMPIEZA QUÍMICA EN SITIO DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA			
DISEÑO			
Capacidad	120 gpm @ 50 psi	Temperatura máxima	40 °C
Flujo máximo por tubo	40 gpm@50 psi	Tubos en paralelo	2
ALCANCE			
Cantidad de equipos	1 pieza		
Operación	MANUAL (Tablero de control)		
COMPONENTES			
Tanque de solución	1 pieza		
Material	Poliétileno de alta densidad		
Capacidad	200 Gal, Tipo Tolva		
Bomba de recirculación	1 pieza, marca GOULDS		
Modelo	15SH06		
Material	Acero inoxidable		
Motor	7.5 HP, 60 HZ, 460V		
Filtro pulidor	1 pieza, Marca Big Bubba		
Modelo	BBH-150		
Material	Polipropileno		
INSTRUMENTACIÓN			
Manómetros para filtro pulidor	2 piezas, 0-100 psi, marca ASHCROFT		
Sensor de nivel bajo	1 pieza, pera de nivel de 7 metros		
Válvulas	Marca SPEARS doble tuerca unión, diferentes medidas.		
Tubería	PVC cédula 80		
Patín	Acero al carbón con recubrimiento anticorrosivo.		

SISTEMA DE DOSIFICACIÓN QUÍMICA (POST-TRATAMIENTO)

BOMBAS DOSIFICADORAS			
FUNCIÓN			
AJUSTE DE pH CON NaHCO ₃ Y DESINFECCIÓN CON NaOCl			
DISEÑO			
Capacidad NaOCl	0.3 GPH @ 80 PSI	Concentración	12%
Capacidad NaHCO ₃	0.5 GPH @ 80 PSI	Concentración	15%
ALCANCE			
Cantidad de equipos	2 Piezas (1 NaHCO ₃ + 1 NaOCl)		
Operación	Automatica		
COMPONENTES			
Bomba Dosificadora	2 piezas, marca IWAKI		
Modelo	EJB		
Cabezal	PVC		
Juntas	EPDM		
Valvula bola	Cerámica		
Kit de instalación	Incluye kid de instalación y sensor de nivel		
Tanque de almacenamiento	2 Piezas, 1 tanque de 20 gal, 1 tanque de 1 m ³		

ANEXO B

“Huertos agrovoltaicos comunitarios: seguridad hídrica, energética y alimentaria para localidades aisladas en regiones áridas”

(Artículo presentado en la XLVI Semana Nacional de Energía Solar, llevada a cabo en Hermosillo, Sonora del 3 al 7 de octubre de 2022)

Nota: El valor de algunas variables presentadas en este trabajo han variado desde momento de la publicación de este artículo a la fecha. De esta manera, se recomienda utilizar como referencia los datos presentados en el trabajo principal de tesis, ya que este presenta información más reciente.

HUERTOS AGROVOLTAICOS COMUNITARIOS: SEGURIDAD HÍDRICA, ENERGÉTICA Y ALIMENTARIA PARA LOCALIDADES AISLADAS EN REGIONES ÁRIDAS

**Carmen S. Araiza González, Karla V. Reyna Jiménez, Rafael. E. Cabanillas López, Demetrio Sotelo Medina,
Irving O. Hernández López, Armando Piña Ortiz**

Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y
Rosales S/N, Hermosillo, Sonora, CP 83000, México, (662) 259 21 06, iq.metalurgia@unison.mx

Rodolfo Peón Anaya*

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N,
Hermosillo, Sonora, CP 83000, México, (662) 662 259 2159, rodolfo.peonanaya@unison.mx

RESUMEN

A pesar de que actualmente cerca del 3% de la electricidad que se consume en el mundo proviene de sistemas fotovoltaicos, el uso de esta tecnología ha mostrado en las últimas décadas un crecimiento exponencial. La significativa reducción en el costo de los módulos solares, la facilidad de instalación y los bajos costos de operación, han convertido a esta fuente de energía renovable en una de las más utilizadas. A nivel global, se espera que la capacidad fotovoltaica instalada sobrepase el tera Watt en 2022 y crezca aproximadamente 5 veces más para el año 2050. El despliegue de estos sistemas requerirá de grandes extensiones de tierra, lo que pudiera comprometer la producción de alimentos para una población en constante crecimiento. Ante este gran reto, los recientemente denominados "sistemas agrovoltaicos", han estado siendo estudiados en distintas regiones del mundo como alternativa para reducir la competencia entre los sectores energético y alimentario por el uso de suelo. Esta integración ha resultado especialmente atractiva en regiones áridas, donde el cultivo de hortalizas bajo la sombra de los módulos fotovoltaicos ha demostrado reducir el estrés térmico sobre las plantas, minimizar su consumo de agua y lograr su supervivencia durante los meses cálidos. Beneficios adicionales incluyen temperaturas ligeramente menores de operación para los módulos fotovoltaicos por la evapotranspiración de las plantas, lo que aumenta de igual medida su eficiencia. Este trabajo presenta el diseño de dos huertos agrovoltaicos de uso comunitario para las localidades de Punta Chueca y El Desemboque, ambos pueblos originarios Comcaac en el estado de Sonora, México. Los sistemas propuestos prometen proveer de energía suficiente y confiable para el suministro de agua de ambas poblaciones de manera permanente. Así mismo, facilitar la producción de alimentos a lo largo de todo año, en una de las regiones más áridas y aisladas del país.

ABSTRACT

Although currently about 3% of the electricity consumed in the world comes from photovoltaic systems, the use of this technology has shown in recent decades an exponential growth. The significant cost reduction of solar modules, their installation simplicity and low operating costs have made of this renewable energy source one of the most widely used. Globally, installed PV capacity is expected to exceed one tera Watt by 2022 and grow approximately 5 times more by 2050. The deployment of these systems will require large extents of land, which could compromise food production for a constantly growing population. To face this great challenge, the recently named "agrovoltaic systems" have been studied in different regions of the world as an alternative to reduce the competition between the energy and food sectors for land use. This integration has been especially attractive for its use in arid regions, where growing crops under the shade of PV modules has shown to reduce thermal stress on the plants, minimize water consumption and ensure their survival during the hot months. Additional benefits include slightly lower operating temperatures for the PV modules due to plant evapotranspiration, which in turn also moderately increases their efficiency. This work presents the design of two community agrovoltaic gardens for the towns of Punta Chueca and El Desemboque, both Comcaac indigenous towns in the state of Sonora, Mexico. The proposed systems promise to provide sufficient and reliable energy for the water supply in both villages, and on a permanent basis. Moreover, to facilitate food production all year round in one of the most arid and isolated regions of the country.

Palabras claves: *sistemas agrovoltaicos, nexa agua, energía y alimentación, Nación Comcaac.*

1. INTRODUCCIÓN

Para que una población se desarrolle de forma saludable es esencial que se garantice su acceso en calidad y cantidad al agua potable, energía y alimentos nutritivos. Al integrar la provisión de estos tres elementos a escala comunitaria, se hace evidente el estrecho y complejo nexo que existe entre la producción de agua, energía y alimentos. La población mundial ha crecido hasta un punto en el cual es posible visualizar una aproximación a los límites planetarios para estos tres recursos esenciales a corto plazo. Esto a ha ocasionado que los sectores energético, hídrico y alimentario empiecen a entrar en conflicto y en ocasiones obligando a la población a priorizar entre la producción de un recurso u otro. Un claro ejemplo es el conflicto cada vez más frecuente entre los sectores agrícola y energético por el uso de suelo. Indudablemente la seguridad alimentaria es una prioridad para una población. Irónicamente, el despliegue de plantas de producción de energía limpia (esenciales para la soberanía energética de las naciones y la mitigación del cambio climático), 'amenazan' con reducir el espacio requerido para la producción de alimentos. Visualizando esta compleja relación entre ambos sectores, en la década de los 80s, dos investigadores del Instituto Fraunhofer en

*Autor de correspondencia

Energía Solar de Alemania, proponen el concepto de ‘sistemas agrovoltaicos’ (AV), el cual combina la tecnología fotovoltaica con la producción agrícola (Goetzberger & Zastrow, 1982). En su trabajo, que considera el recurso y el movimiento solar aparente a lo largo del año para Alemania, los autores proponen elevar los paneles 2 metros sobre el suelo, dejando espacio para cultivos resistentes a la sombra. Este concepto se ha evaluado principalmente en otros países de Europa y en Japón (Toledo & Scognamiglio, 2021). Los resultados han demostrado que además de hacer uso óptimo del suelo (Weselek *et al.* 2019), los sistemas AV reducen significativamente el consumo de agua de los cultivos, mientras que la evapotranspiración de las plantas disminuye ligeramente la temperatura de los módulos fotovoltaicos. Estas características hacen que los sistemas AV sean altamente atractivos para su implementación en regiones áridas, donde la escasez de agua y las altas temperaturas dificultan la producción agrícola, mientras que el recurso solar es abundante (Burney *et al.* 2010; Dinesh & Pearce, 2016; Randle-Boggis *et al.*, 2021).

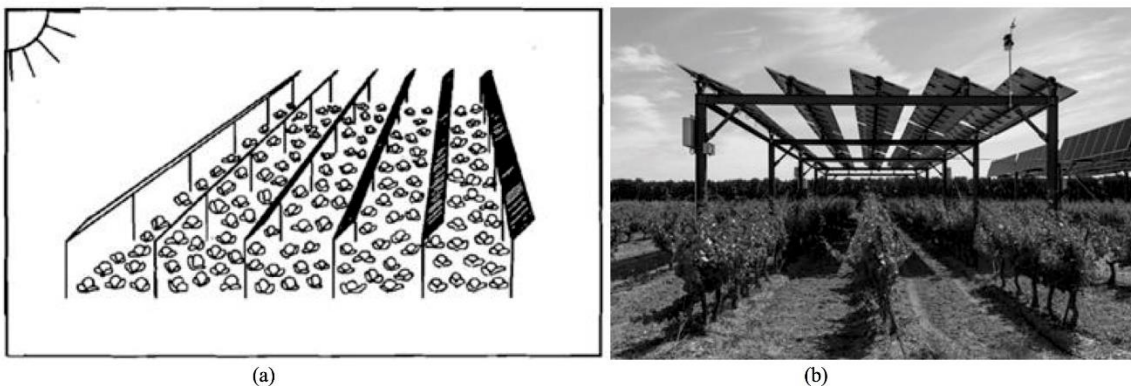


Figura 1. (a) Conceptualización de los sistemas agrovoltaicos por (Goetzberger & Zastrow, 1982) y granja agrovoltaica vitícola experimental en Vacluse, Francia (Rollet, marzo 2020).

Un ejemplo exitoso de la implementación de los sistemas AV en regiones áridas, se muestra en un estudio realizado por investigadores de la Universidad de Arizona. En este trabajo se demostró que algunos cultivos como el chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), una especie endémica de climas cálidos y tolerante a la sombra, pueden triplicar su producción con un mismo consumo de agua. En este trabajo se observó también que, otras especies como el chile jalapeño (*Capsicum annuum* var. *annuum*), ofrecen una producción similar a la obtenida usando métodos agrícolas convencionales; sin embargo, con una eficiencia 1.5 veces mayor en el uso de agua (Barron-Gafford *et al.*, 2019). Actualmente, este grupo de investigación, en colaboración con la Universidad de Sonora y otras instituciones, se encuentra trabajando en la implementación de estos sistemas AV en la Nación Comcaac.

Con la intención de contribuir a este esfuerzo colaborativo, en este trabajo se presenta el diseño y un análisis preliminar del potencial de los sistemas AV a escala comunitaria, para facilitar la seguridad energética, hídrica y alimentaria en esta comunidad costera del norte de México. De manera particular, este trabajo propone la conversión de dos sistemas fotovoltaicos (FV) interconectados a la red en las localidades de Punta Chueca y El Desemboque, cuyas funciones son las de proveer el 100% de la energía requerida para la operación de una planta desaladora y un pozo de agua dulce, respectivamente.

2. METODOLOGÍA

El diseño de los huertos AV comunitarios presentados en este trabajo es el resultado de una revisión bibliográfica del estado del arte en la implementación de estos sistemas, particularmente en regiones áridas. La selección del cultivo a evaluar resultó de una serie de entrevistas realizadas a expertos en temas de conservación, sistemas agrovoltaicos y productores agrícolas regionales. De una serie de especies nativas y no nativas sugeridas por los expertos entrevistados, el chiltepín fue seleccionado por sus características superiores a los demás frutos en términos de: ser una especie local, ser un alimento tradicional, requerir un bajo consumo de agua y tener un alto valor en el mercado. Una vez seleccionado el cultivo a evaluar, los parámetros de consumo de agua, fertilizantes y cuidados fueron consultados con un experto local productor de chiltepín.

Por otra parte, el ejercicio de dimensionamiento de los sistemas FV para ambas localidades fue realizado estimando una cobertura del 100% de su consumo energético considerando el recurso solar local disponible. Los valores del recurso solar fueron consultados en el portal de Global Solar Atlas, del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés) (Global Solar Atlas, 2022). Posteriormente, una estimación de la producción de energía fue obtenida utilizando la plataforma PVWatts; otra herramienta ofrecida por el

mismo laboratorio (PVWatts, 2022). Una vez que el dimensionamiento de los sistemas FV fue completado, se diseñó un modelo en 3D de los huertos para cada localidad, utilizando la herramienta Google SketchUp. Este software permitió a su vez observar la radiación directa sobre el área efectiva de cultivo a lo largo del año. Finalmente, una vez identificada el área efectiva de cultivo, se procedió a hacer un balance de producción/consumo de alimentos, agua y energía, el cual fue realizado desarrollando una hoja de cálculo en Microsoft Excel. Este estudio incluyó a su vez una estimación de retorno de inversión simple, para visualizar la viabilidad económica de los sistemas AV en ambas localidades.

3. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA AGROVOLTAICO

3.1 Dimensionamiento Fotovoltaico

El dimensionamiento del sistema FV inicia con la estimación del consumo energético de la planta desaladora de Punta Chueca y del pozo de agua dulce de El Desemboque. En el caso de Punta Chueca, haciendo un elaborado cálculo, que considera todas las cargas eléctricas del sistema y una producción de agua potable de 150 m³ a partir de agua de mar, se obtuvo un consumo energético aproximado de 840.33 kWh/diarios. En el caso de El Desemboque, se estimó un consumo de energía de 56.04 kWh/diarios, al consultar los recibos de consumo eléctrico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de los últimos 9 meses.

Posteriormente se procedió a consultar el recurso solar disponible en ambas localidades, de manera particular la irradiación solar global diaria en un plano con inclinación óptima; los resultados se muestran en la Tabla 1. Con esta información se hizo una estimación de las horas solares pico para ambas localidades, dividiendo el promedio de irradiación anual entre 1,000 W/m². Este valor corresponde a la irradiancia de referencia usada por los fabricantes de módulos FV como condiciones estándar de operación. Las horas solares pico obtenidas para Punta Chueca y El Desemboque resultaron ser de 6.74 y 6.75, respectivamente.

Tabla 1. Datos de irradiación solar global en plano inclinado óptimo para las localidades de Punta Chueca y El Desemboque (PVWatts, 2022).

Mes	Punta Chueca	El Desemboque
	Irradiación (kWh/m ² /día)	Irradiación (kWh/m ² /día)
Enero	6.07	5.98
Febrero	6.79	6.66
Marzo	7.34	7.51
Abril	7.44	7.65
Mayo	7.41	7.50
Junio	7.01	7.20
Julio	6.43	6.53
Agosto	6.68	6.80
Septiembre	6.84	6.98
Octubre	6.82	6.95
Noviembre	6.30	6.31
Diciembre	5.89	5.73

Finalmente, el tamaño de los sistemas FV requeridos, se obtuvo dividiendo el consumo de energía de la planta desaladora de Punta Chueca y el pozo de El Desemboque entre las horas solares pico de su respectiva localidad. Considerando un 30% de pérdidas en la producción de energía por los módulos FV, causados por efectos eléctricos, térmicos, suciedad y envejecimiento de los mismos, se estimó una capacidad de 178.11 kW y 11.86 kW para Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente. Los sistemas FV actualmente instalados son de 386 kW y 17.48 kW, lo que indica que el consumo eléctrico de la planta desaladora y el pozo están cubiertos en un 217% y 147%, respectivamente. Esto se validó a su vez utilizando el Software PVWatts de NREL (Figura 2).

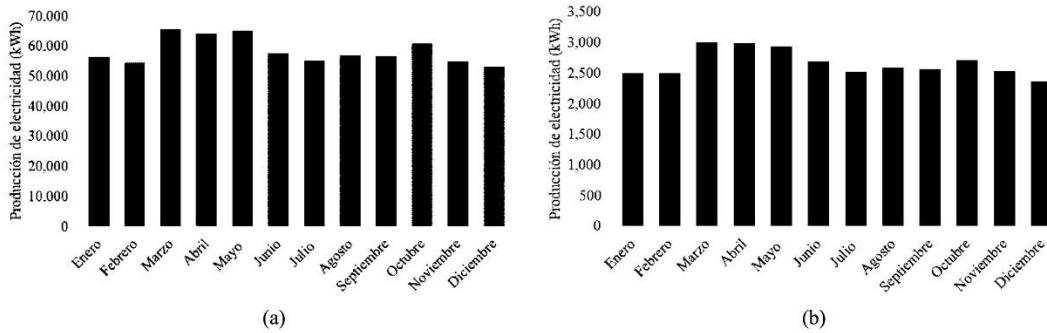


Figura 2. Producción anual del sistema FV de (a) Punta Chueca y (b) El Desemboque.

3.2 Dimensionamiento de los huertos

Ya que en ambos sitios de estudio ya se cuenta con sus sistemas FV instalados, el diseño de los huertos comunitarios consistió en delimitar el área de cultivo basándose en la sombra proyectada por los módulos en el suelo. De esta manera, el área efectiva para fines agrícolas resultó ser de 1,897 m² y 43 m² para las localidades de Punta Chueca y El Desemboque, respectivamente.

3.3 Modelación 3D

Una modelación en 3D de ambos sistemas AV fue realizada utilizando el programa Google Sketch Up, y se muestra en la Figura 3. Esta plataforma ofreció la posibilidad de hacer una proyección de sombras para diferentes estaciones del año, donde el área efectiva de cultivo se delimitó a la región sombreada durante el medio día solar en el solsticio de verano. Usando estas condiciones como referencia, se buscó maximizar la protección de los cultivos de la radiación solar directa en los días más largos del año. Además, la altura de los módulos solares se seleccionó para garantizar que la radiación directa incidiera en cultivos durante los meses de invierno, cuando la órbita aparente solar es más baja.

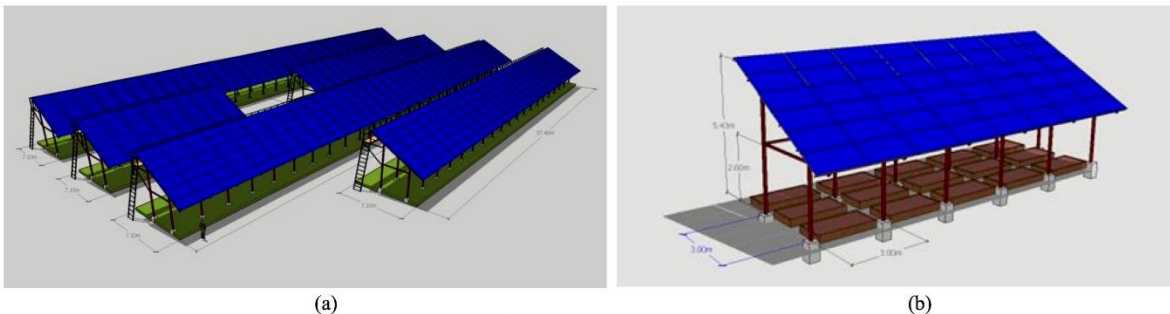


Figura 3. Representación 3D de huertos agrovoltaicos en (a) Punta Chueca y (b) El Desemboque.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del modelado de los huertos AV propuestos, muestran que su implementación en ambas localidades ofrece una solución altamente rentable para sus usuarios. Como puede observarse en la Tabla 2, la producción agrícola reduce significativamente su retorno de inversión, siendo que su conversión de FV a AV, solo implica una inversión adicional de aproximadamente un 5% de su costo inicial. Sorprendentemente, puede apreciarse que esto es factible inclusive en el caso que la actividad agrícola se lleve a cabo en modalidad silvestre, es decir con una sola cosecha al año y utilizando los elementos naturales como el sol y la lluvia para la producción de chiltepín.

Tabla 2. Resultados de análisis de balance de producción/consumo de alimento, agua y energía para los sistemas AV comunitarios propuestos.

PRODUCCIÓN DE ALIMENTO		
	Punta Chueca	El Desemboque
Área cultivable (m ²)	1,897	43
Densidad de plantas (#/m ²)	0.50	0.50
Número de plantas posible en huerto A-FV (#)	3,794	86
Precio de venta de chiltepín (\$/L)	400	400
Producción en modo industrial		
Producción (L/planta/año)	20	20
Ingresos por ventas de Chiltepín (\$/año)	30,352,000	688,000
Fertilizante orgánico (L/m ² /semana)	0.76	0.02
Gasto en fertilizante (\$/año)	3,945.76	89.44
Consumo de agua (L/planta/semana)	3.50	3.50
Consumo de agua (m ³ /año)	690.51	15.65
Precio de agua potable (\$/m ³)	15.36	15.36
Gasto en agua potable (\$/año)	10,608.71	240.47
Mantenimiento del sistema A-FV (\$/año)	1,058,880	24,000
Balance (\$/año)	29,278,565.53	663,670.09
Producción en modo silvestre		
Producción silvestre (L/planta/año)	2	2
Ingresos por ventas de Chiltepín (\$/año)	3,035,200	68,800
Gasto en fertilizante (\$/año)	0	0
Gasto en agua (\$/año)	0	0
Mantenimiento del sistema A-FV (\$/año)	105,888	2,400
Balance (\$/año)	2,929,312	66,400
CONSUMO DE AGUA		
	Punta Chueca	El Desemboque
Consumo diario (L/día)	1,891.80	42.88
Recuperación de Desaladora (%)	0.40	N/A
Producción de Salmuera (L/día)	2837.70	N/A
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA		
	Punta Chueca	El Desemboque
Tamaño del Sistema FV (kWp)	386	17.50
Producción anual (kWh)	702,613	31,980
Precio medio por tarifa aplicable (\$/kWh)	1.41	3.21
Cobertura de consumo eléctrico	217%	147%
Gasto aproximado en energía (\$/mes)	35,937.41	5,469.90
Ahorro aproximado (\$/año)	431,248.95	65,638.81
Costo estimado por Watt instalado (USD)	2	2
Costo estimado de sistema FV (\$)	15,826,000	717,500
Costo estimado de huerto (\$)	791,300	35,875
Costo estimado de sistema A-FV (\$)	16,617,300	753,375
Retorno de inversión simple		
Solo produciendo energía (años)	38.53	11.48
Energía y producción silvestre (años)	4.95	5.71
Energía y producción industrial (años)	0.56	1.03



Por otra parte, este estudio demuestra que el cultivo de plantas nativas y propias de climas áridos prometen un uso responsable del recurso hídrico. Esto es particularmente deseable para la localidad de Punta Chueca, donde este proviene en su totalidad de una planta desaladora. En este sitio, por cada litro de agua potable producida (además de requerir una cantidad significativa de energía), se genera un litro y medio de salmuera que actualmente es devuelto al mar, afectando al ecosistema local.

En términos de energía, puede observarse en la Tabla 2, que el ahorro en el consumo de electricidad para la provisión de agua en ambas localidades es sustancial. En el caso de Punta Chueca, sin los sistemas FV, el costo del agua potable sería prohibitivo sin algún tipo de subsidio, mientras que, para El Desemboque, el ahorro generado es crucial para facilitar el pago oportuno del servicio eléctrico del pozo. Es importante mencionar que, la tarifa aplicada a la planta desaladora de Punta Chueca es la GDBT (gran demanda baja tensión), mientras que en El Desemboque es la PDBT (pequeña demanda baja tensión). Por esta razón, existe a una diferencia en el costo por kWh de energía consumido en ambas localidades, como puede apreciarse en la Tabla 2.

5. CONCLUSIONES

De manera general, se observó a partir de este estudio que existe una amplia variedad de especies de plantas que pueden cultivarse en sistemas AV. Esto abre la posibilidad de que las familias en localidades apartadas puedan producir alimentos frescos, los cuales son generalmente escasos y costosos, así como plantas medicinales. Esto se traduciría en una mejor nutrición, una mejor salud y posibilidades de obtener ingresos adicionales.

Este estudio permitió también observar la enorme ventaja que ofrece la conversión de los sistemas FV a sistemas AV en términos de retorno de inversión. Esto abre la posibilidad de que más localidades del país en condiciones de inseguridad energética, hídrica y alimentaria y con financiamiento limitado puedan revertir dicha situación mediante la implementación de sistemas AV. Además, se visualiza que un reducido retorno de inversión permitiría el escalamiento de dichos sistemas para una producción industrial, lo que aumentaría significativamente los ingresos y por consiguiente las condiciones de vida en dichas localidades.

Cabe mencionar que este estudio consideró el cultivo de chiltepín, una especie endémica y propia de ambientes áridos, por lo que pudo observarse un consumo reducido de agua. Sin embargo, el cultivo de otras especies no endémicas de ecosistemas áridos puede fácilmente convertir a los huertos AV en ávidos consumidores del escaso recurso hídrico. Para estos casos es altamente recomendado el uso de medidas de ahorro como es el riego por goteo. Por otra parte, el chiltepín es una especie tolerante a la sombra, por lo que el cultivo de otras especies menos tolerantes a la sombra implicará modificaciones en el diseño de los huertos AV, para que estos ofrezcan las condiciones de iluminación y temperatura que requieren las plantas.

Finalmente, este estudio preliminar consideró un cultivo de alto valor agregado y asume un mercado dispuesto a adquirir toda la producción agrícola. En la práctica será necesario considerar huertos comunitarios con policultivos, donde además entrarán en juego otros factores determinantes como los ambientales, económicos, sociales, etc.

6. REFERENCIAS

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K. & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.

Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308.

Global Solar Atlas. (2022). Consultado en julio 2022 en: <https://globalsolaratlas.info/map>

Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69.

PVWatts. (2022). NREL's PVWatts Calculator. Consultado en julio 2022 en: <https://pvwatts.nrel.gov/index.php>

Randle-Boggis, R. J., Lara, E., Onyango, J., Temu, E. J., & Hartley, S. E. (2021, June). Agrivoltaics in East Africa: Opportunities and challenges. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2361, No. 1, p. 090001). AIP Publishing LLC.

Rollet, C. (2020, marzo). A good year for solar: Agrivoltaics in vineyards. *PV Magazine*. Consultado en mayo 2022 en: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/31/a-good-year-for-solar-agrivoltaics-in-vineyards/>

Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871.

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. *A review. Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 1-20.