

Diseño de plantas solares Fotovoltaicas bajo la perspectiva ecovoltaica

<https://doi.org/10.51378/ilia.vi1.8527>

R. Arévalo ¹, J. Campos ¹, C. García ¹, R. Gómez ¹

¹ Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA, El Salvador
E-mail: rdgomez@uca.edu.sv

Resumen - El incremento de la demanda de energía a nivel mundial y la necesidad de reemplazar el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica ha llevado a la expansión y adopción de las energías renovables. Sin embargo, algunas fuentes, como la energía solar fotovoltaica, requieren grandes cantidades de terreno. Al mismo tiempo, los impactos del cambio climático y el crecimiento poblacional amenazan la seguridad alimentaria a nivel nacional y global. Dentro de este contexto, en este artículo se propone el concepto de la ecovoltaica, que consiste en diversas tecnologías y prácticas aplicadas a las instalaciones fotovoltaicas que busca mitigar la mayoría de impactos ambientales que pueda causar una planta de este tipo y utilizar los terrenos con doble propósito. El objetivo de esta investigación ha sido definir las mejores prácticas y tecnologías para diseñar e implementar una planta fotovoltaica bajo la perspectiva ecovoltaica. Estas metodologías se han obtenido a través de una revisión bibliográfica y distintas simulaciones para comparar objetivamente el efecto de las varias consideraciones de diseño. Adicional a esto, se ha encontrado que los sistemas diseñados bajo la perspectiva ecovoltaica proveen una solución sostenible a los problemas anteriormente mencionados en términos de uso de la tierra y producción eléctrica.

Palabras Clave – agrovoltaica, ecovoltaica, ganadovoltaica, paneles solares

I. INTRODUCCIÓN

A. Definición de la perspectiva ecovoltaica

En los últimos años la utilización de los paneles solares ha tenido una gran demanda debido al aumento de la investigación e implementación de energías renovables. Este incremento en la demanda ha intensificado la necesidad de optimizar la parte tecnológica para minimizar el impacto ambiental y mejorar el rendimiento socioeconómico.

La fotovoltaica, como elemento clave hacia la transición energética, necesita ser optimizada de la mejor manera posible para poder reducir sus impactos ambientales inherentes como; problemas con el uso de las tierras, transformación del entorno, efectos negativos en ecosistemas, biodiversidad, bienestar humano y finalmente la generación de gases de efecto invernadero durante la producción, distribución, instalación y disposición final del equipo necesario para una planta fotovoltaica. Con el propósito de mitigar la mayoría de los impactos ambientales mencionados anteriormente, surge la perspectiva ecovoltaica, la cual integra distintas tecnologías y prácticas que buscan la descarbonización y mejorar la integración con el medio ambiente de los proyectos fotovoltaicos.

La ecovoltaica fue un concepto desarrollado por Soltec, una empresa internacional que se especializa en la fabricación y suministro de paneles solares, con el objetivo de reforzar su compromiso y misión de mejorar la sostenibilidad de la actividad fotovoltaica. La ecovoltaica apuesta por la conservación de su entorno, la minimización del impacto de los parques fotovoltaicos y por mejorar los diseños de los parques solares para lograr la recuperación de la flora y fauna [1].

Es necesario destacar que dentro de la perspectiva ecovoltaica se incluyen prácticas como la agrovoltaica que consiste en aprovechar una misma superficie de terreno para obtener energía solar y productos agrícolas. Además, el aprovechamiento de la energía solar en áreas agrícolas favorece en gran medida el autoconsumo fotovoltaico debido a que las necesidades energéticas de las explotaciones pueden cubrirse fácilmente con la electricidad generada [2].

Uno de los objetivos de la ecovoltaica es ayudar a cumplir las metas de desarrollo sostenible (SDGs por sus siglas en inglés) las cuales se enfocan en la interacción entre la naturaleza y el humano. Generalmente, estas metas están diseñadas para facilitar el desarrollo de la economía, el ecosistema y la vida social.

B. Identificación de tecnologías y prácticas que se alinean con la ecovoltaica

Se realizó una visita técnica a una de las empresas que ha ido desarrollando la perspectiva ecovoltaica en El Salvador. La visita fue guiada por el ingeniero José Luis Regalado, quien es el encargado de la planta Renovables El Salvador Uno (RESU), ver fig. 1, el cual tiene una capacidad instalada de 1.2 MW [3].



Fig. 1. Paneles solares de la planta Renovables El Salvador Uno

Según el ingeniero Regalado [3], la mayoría de los terrenos de la zona donde se encuentra la planta fotovoltaica son plantaciones de caña de azúcar, cocos y mangos. Cuando se diseñó el proyecto se pensó en realizar el parque solar sin ninguna otra actividad. Sin embargo, después de haber realizado la instalación se destinó una parte del terreno para el cultivo agrícola y, en épocas de sequía, para pastar ganado. Por el momento se tiene por separado la parte de generación solar y una parte para cultivo de maíz, frijol y melones. Además, considerando la instalación de mesa fija de los paneles, se ha contemplado implementar el cultivo de plantas ornamentales de sombra para aprovechar el espacio que se tiene debajo de los mismos.

C. Integración con la región y desarrollo sostenible a gran escala

Para definir el tipo de diseño de un proyecto fotovoltaico que permita integrarlo con algún tipo de cultivo y asegurar el buen funcionamiento de la producción eléctrica y agrícola es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- La radiación solar en términos de la intensidad de la luz y la radiación de activación fotosintética (PAR).
- La categoría del sistema agrovoltaico que se pretende implementar.
- La perspectiva de los agricultores involucrados.

Por ejemplo, en la planta fotovoltaica Renovables El Salvador Uno [3], la implementación de otras actividades dentro del terreno del parque fotovoltaico nació para tratar de interactuar con las comunidades cercanas, ver fig. 2.



Fig. 2. Zona de cultivos en la planta Renovables El Salvador Uno

Un buen diseño de un sistema fotovoltaico que asegure la integración de un buen manejo de cultivo tiene que tomar en cuenta cómo maximizar la exposición a una alta calidad de la irradiación solar de los paneles fotovoltaicos y la exposición óptima del flujo de PAR para los cultivos debajo de los paneles. Entre las modificaciones que se pueden implementar para un diseño ecovoltaico son:

- Elevación de la estructura del sistema fotovoltaico.
- Optimización de la distancia entre la estructura del sistema fotovoltaico.

- Configuración de la densidad de los paneles solares por estructura.

D. Agrovoltaica

La agrovoltaica es una aplicación de la ecovoltaica, que integra la generación de energía eléctrica con módulos solares y la agricultura en una misma superficie. Su mayor beneficio es que se reduce la competencia del uso del suelo. Este concepto surge debido al gran crecimiento y desarrollo que ha tenido la fotovoltaica en los últimos años, y la búsqueda de soluciones que sean todavía más amigables con el medio ambiente, sobre todo en el sector agricultura. Como consecuencia de la utilización de estos sistemas en paralelo se tiene una variedad de sinergias o ventajas para ambos sistemas:

- Uso eficiente de los suelos
- Reduce emisión de gases de efecto invernadero
- Reducción de temperatura en paneles, mejora de la eficiencia
- Protección a los cultivos frente a eventos meteorológicos
- Sombra a los cultivos que lo requieran
- Reducción de la evaporación
- Disminuye velocidad del viento
- Creación de empleo local

E. Indicadores de desempeño para un sistema agrovoltaico

1. Relación de cobertura del suelo:

Este parámetro es de alta importancia para un sistema agrovoltaico, se define como la razón entre la superficie de los paneles solares y la superficie de la tierra cultivada. Un valor alto de relación de cobertura del suelo se traduce en una alta producción de energía, mientras que la producción de cultivos será baja en ciertos casos por la reducción de la radiación solar. Sus siglas en inglés son GCR (Ground Coverage Ratio) y se calcula de la siguiente manera:

$$GCR = \frac{A_{PV}}{A_{ground}} \quad (1)$$

Donde A_{PV} es el área superficial de los módulos solares y A_{ground} es el área superficial cultivada.

2. Rendimiento energético y agrícola:

Rendimiento energético $Y_{el,AV}$ es la energía eléctrica producida anualmente entre el área total que utiliza el sistema agrovoltaico. Generalmente se mide en MWh/ha. El rendimiento agrícola $Y_{agri,AV}$ relación entre la cantidad de productos agrícolas en unidad de masa entre el área total. Es medido en unidades de kg/ha.

3. *Calidad agrícola:*

Es un parámetro cualitativo que mide los efectos positivos que brinda el sistema fotovoltaico a la parte agrícola, como, por ejemplo, reducción de quemadura solar en los cultivos, protección contra fuertes lluvias, etc. Este parámetro es muy amplio y depende del tipo de cultivo con el que se esté trabajando.

4. *Eficiencia espacial:*

La eficiencia espacial se calcula con el LER (Land Equivalent Ratio) donde se compara el rendimiento energético y agrícola en condiciones normales y estando en una configuración agrovoltaica. La letra “N” representa la condición normal y “AV” representa la condición agrovoltaica. La letra “E” representa el valor de mercado de la producción agrícola obtenida en cada condición mencionada.

$$LER = \frac{E(Y_{agri,AV})}{E(Y_{agri,N})} + \frac{Y_{el,AV}}{Y_{el,N}} \quad (2)$$

5. *Ahorro de agua:*

Una forma de medir el ahorro de agua es a partir de la eficiencia de su uso, WUE (Water Usage Efficiency), el cual se calcula como unidad de biomasa producida por volumen de agua utilizado, en condiciones normales y en una condición donde los cultivos se encuentran en una planta fotovoltaica.

$$WUE = \frac{WUE_{pv} - WUE_{control}}{WUE_{control}} \quad (3)$$

6. *Indicadores económicos:*

Como principal indicador se tiene la relación costo-beneficio.

$$\frac{CT}{BN} = \frac{\text{Costos totales}}{\text{Ingresos totales netos}} \quad (4)$$

F. *Categorías de sistemas agrovoltaicos*

Existen dos categorías principales de agrovoltaica. Como primera categoría se tiene el caso de los módulos solares montados en el suelo o cerca de éste, utilizando el espacio entre las filas de módulos para la actividad agrícola o la otra forma, en la que se montan los módulos sobre estructuras más altas haciendo mayor el área cultivable [4], ver fig. 3 y 4.

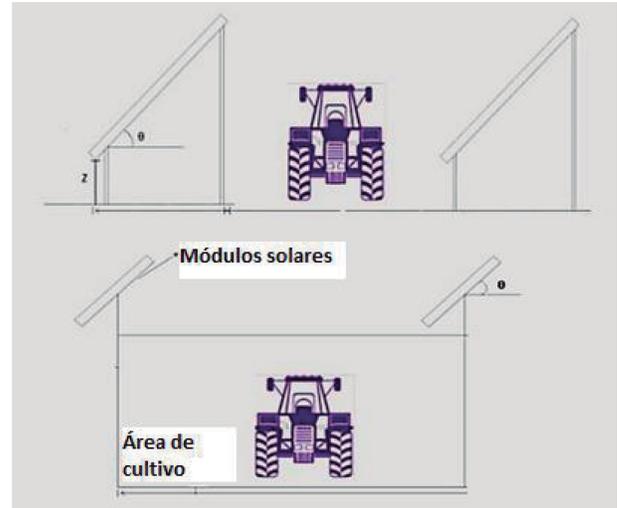


Fig. 3. Principales tipos de montaje en la agrovoltaica [5]

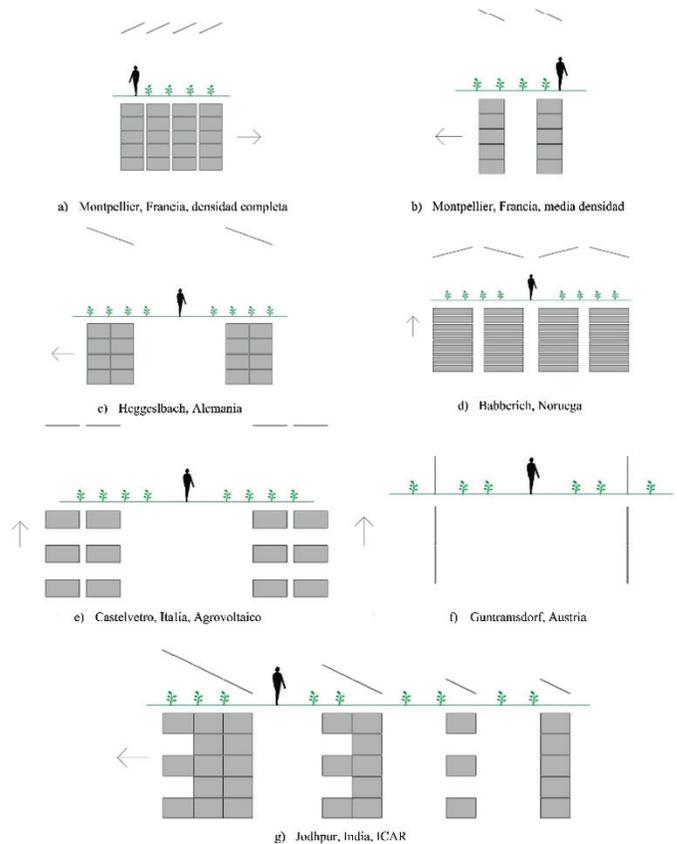


Fig. 4. Distintos diseños de sistemas agrovoltaicos a cielo abierto [5]

G. *Ganadovoltaica*

El término ganadovoltaica hace referencia al aprovechamiento de los cambios ambientales que genera un sistema fotovoltaico para la producción ganadera. Una de las mayores sinergias entre la ganadería y la fotovoltaica es el aprovechamiento de las sombras, según R.J. Collier tiene un impacto directo en la producción y calidad de la leche bovina.

A diferencia de la agrovoltaica, la radiación que recibe el suelo pasa a ser de menor importancia y se tiene como consideración principal que los soportes de los módulos solares tengan la altura suficiente para acomodar el movimiento del ganado.

H. Acuivoltaica

La acuivoltaica es el concepto de combinar las prácticas de crianza de especies acuáticas vegetales y animales, acuicultura, y la generación de energía con plantas fotovoltaicas flotantes. El objetivo de la acuivoltaica es el uso eficiente del agua para la generación de alimentos y energía [6].

Algunas de las potenciales sinergias entre la acuicultura y fotovoltaica son las siguientes:

- Incremento en la conservación del agua
- Medio ambiente acuático controlado
- Restauración del ecosistema

Algunos de los elementos perjudiciales de la acuivoltaica son:

- Impactos ecológicos
- Bioincrustación

I. Planeación y diseño sostenible para la aceptación pública

La disposición final y diseño de los proyectos fotovoltaicos también se debe tomar en cuenta a la hora de crear un parque solar ecovoltaico. Como dice la asociación de los países bajos para la investigación científica aplicada (TNO) se debe trabajar en lograr que los parques solares respeten el valor histórico y cultural del paisaje. Esto se puede combinar con el mantenimiento, reestructuración o restablecimiento de áreas con valor ecológico [7].

En una asociación entre TNO, LC Energy, Wageningen University & Research, Eelerwoude y SolarCentury se encuentra investigando los efectos de las innovaciones en los parques solares sobre la calidad de la tierra y su biodiversidad. El objetivo principal de esta asociación es determinar los beneficios ecológicos y económicos del uso de paneles bifaciales sobre los diferentes tipos de suelos en los países bajos: arena, turba y arcilla [7].

La fotovoltaica ya no es una nueva tecnología en el contexto global, sin embargo, puede ser considerada como una fuente de energía innovadora y poco comprendida en contextos locales. A primera vista, el problema de la aceptación parece poco problemático, varios estudios muestran que existe gran aceptación de las energías renovables. Sin embargo, en países como El Salvador, el cual está en una etapa temprana de la implementación de estas energías a gran escala, es necesario tomar en cuenta la aceptación pública, sobre todo de las poblaciones que residen en las cercanías del proyecto.

2. Economía circular y cadena de suministro sostenible

Para asegurar que la energía solar sea sostenible a largo plazo, se debe asegurar tal condición a la cadena de suministro. Sin embargo, y opuesto a la razón de implementar esta tecnología, la fabricación de módulos solares requiere de usar materiales difíciles de obtener y que requieren una gran cantidad de energía para su refinamiento.

Debido a las razones anteriores y sumando que se prevé que el consumo de materias primas y desechos se duplique para el año 2050, surge la necesidad de integrar la economía circular al momento de tratar un proyecto fotovoltaico. Según Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M., una economía circular es un sistema económico basado en modelos de negocios que reemplazan el concepto de “fin de vida” con la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en procesos de producción/distribución y consumo, con el fin de lograr un desarrollo sostenible, lo que implica reducir la huella ambiental, mejor prosperidad económica y equidad social, para beneficio de las nuevas generaciones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos

Para lograr un buen dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos es necesario determinar ciertos valores meteorológicos de la zona de instalación, el tamaño del terreno disponible y el tipo de práctica que se tendrá junto a la generación de energía, ya sea agrovoltaica, ganadovoltaica o acuivoltaica. Este dimensionamiento utiliza valores medios mensuales que son obtenidos diariamente de la irradiación global y de la carga. De esta forma se puede establecer una estimación de la irradiación solar que son necesarios para el dimensionamiento de los generadores fotovoltaicos que se implementarán en el proyecto.

Para establecer el número de módulos en función de las condiciones de irradiación promedio del año. Se debe de determinar y conocer las potencias de los módulos seleccionados para la instalación que viene en las características técnicas de los módulos elegidos por el fabricante. A partir de eso, se establece la fórmula para instalaciones de uso diario [8]:

$$N^{\circ}_{\text{paneles}} = \frac{\text{Energía}}{(HSP \times \text{Rendimiento} \times P_{\text{max}})} \quad (5)$$

Donde:

N° paneles: número de paneles necesarios

Energía: energía diaria necesaria en kWh

HSP: hora solar pico

Rendimiento: rendimiento de trabajo del panel

P_{max} : potencia máxima del módulo

En el caso que se tenga un terreno y se quiera encontrar cuanta energía es posible generar se debe hacer el cálculo con base en el espacio que ocuparán los paneles solares que se instalarán y la capacidad que tiene cada uno de ellos. También se debe tomar en cuenta el espacio que no se utilizará para paneles solares según como sea necesario por la otra actividad a realizar, ya que esto es espacio que no se debe tomar en cuenta en el cálculo. Reordenando la ecuación 5 se tiene:

$$N^{\circ}_{\text{paneles}} = \frac{A_{\text{terreno}}}{A_{\text{panel}}} \quad (6)$$

$$P_{\text{generada}} = \frac{\text{Energía}}{HSP} \quad (7)$$

Ecuación 6 y 7 en 5:

$$P_{\text{generada}} = \frac{A_{\text{terreno}}}{A_{\text{panel}}} \times P_{\text{max}} \times \text{Rendimiento} \quad (8)$$

Donde:

P_{generada} : potencia que se generará con los paneles instalados

A_{terreno} : área del terreno disponible para la instalación de los paneles

A_{panel} : área que utiliza cada panel solar

B. Prácticas de la agrovoltaica

Para que se produzca un buen desarrollo del cultivo se tienen que considerar distintos aspectos desde la parte de la siembra, pasando por el crecimiento de este hasta llegar a su recolección. Los factores que se pueden ver afectados y que son necesarios considerar al momento de desarrollar un diseño ecovoltaico para un sistema fotovoltaico son la humedad y la temperatura.

C. Prácticas de la Acuivoltaica

Los sistemas cerrados de acuicultura necesitan un movimiento de agua para [9]:

- Mantener el nivel de oxígeno disuelto lo suficientemente alto para que los peces sobrevivan.
- Bombear agua por los canales y tanques según cual se utilice.
- Reemplazar el agua perdida por evaporación, filtración o pérdidas.

Los factores de diseño que afectan el rendimiento del sistema son [10]:

- Buen rendimiento estructural de las plataformas flotantes como un cuerpo parcialmente sumergido.
- Buen comportamiento estructural del reservorio y la cubierta flotante como un todo.
- Habilidad de adaptarse a niveles de agua cambiantes y diferentes distribuciones del reservorio.

D. Mantenimiento de los módulos solares

La mayoría de los paneles solares en el mercado están diseñados para ser expuestos a los elementos y distintas condiciones ambientales. Sin embargo, las condiciones que se mencionan a continuación pueden disminuir su rendimiento:

- Sombras
- Acumulación de polvo
- Degradación por daños

E. Determinación del impacto medio ambiental de sistemas fotovoltaicos

Siempre existen problemas ambientales que están asociados principalmente con la fabricación y disposición final de los módulos solares [11]. La generación de energía eléctrica mediante la energía solar fotovoltaica necesita de grandes superficies colectoras y, por consiguiente, el diseño y fabricación de estas utiliza una gran cantidad de materiales. Además, en la producción del panel solar se produce un gasto energético que termina creando residuos de ciertas partículas dióxido de azufre y dióxido de carbono, ya que la energía que es utilizada en la fabricación del panel solar tiene su origen en la mezcla de fuentes energéticas convencionales del país de fabricación [12].

1. *Definición de impactos medioambientales en sitio:* Las plantas fotovoltaicas tienen diferentes impactos medioambientales relacionados con el territorio y el paisaje. Estos impactos son presentados a continuación basado en la descripción del trabajo de Roberto Chiabrando, Enrico Fabritzio y Gabriele Garnero en 2009.

2. *Uso de la tierra:* Con diferentes pruebas, la literatura reporta que un sistema puede tener el doble de área que la de los paneles. En términos de energía esta área puede ser cuantificada entre 28 y 64 m²/MWh. Cabe recalcar que el uso de suelo de los sistemas fotovoltaicos es uno de los más grandes entre las tecnologías de generación de energía [13].

3. *Reducción de áreas de cultivo:* Si los sistemas medianos o grandes montados en el suelo son colocados en zonas antes cultivadas, esto no solo representaría un uso del suelo, sino que también reducción de áreas potencialmente cultivables. Por lo tanto, la generación de energía podría ser vista como competencia de la producción de comida.

Estos impactos se reducen significativamente al implementar una instalación ecovoltaica, ya que el área se puede usar simultáneamente para el cultivo y la generación de energía.

- Fragmentación del campo y degradación de vegetación
- Impacto visual en el paisaje
- Interferencia con la flora y fauna
- Cambios en el microclima
- Destello

- Campos electromagnéticos
- Impactos de la fase de construcción

F. Comparativa técnica

El objetivo de realizar una comparativa entre sistemas fotovoltaicos convencionales y sistemas diseñados bajo la perspectiva ecovoltaica, es validar las ventajas y desventajas que tiene cada tipo de diseño de plantas fotovoltaicas. Para ello se compararán dos diseños hechos bajo la perspectiva ecovoltaica con un caso base enfocado en la producción de energía y con las consideraciones de diseño más comunes en el mercado global.

Como se puede observar en la fig. 5, se ha seleccionado un terreno agrícola con el objetivo de que la agricultura sea la actividad primaria en los casos que se implementa la ecovoltaica, en la tabla 1 se encuentran los detalles del terreno.



Fig. 5. Ubicación aproximada del proyecto fotovoltaico

Tabla 1. Ubicación del proyecto fotovoltaico

Coordenadas	13.517808533413035, -88.81362742061134
Departamento	San Vicente
Municipio	Tecoluca
Área	0.018 km ²

Para todos los casos expuestos se utilizará la misma ubicación, un terreno disponible de 0.018 km² y un tiempo de vida del proyecto de 30 años con el fin de poder comparar de manera objetiva los distintos tipos de sistemas ecovoltaicos con un caso base. Como herramienta de diseño y comparativa se ha utilizado la herramienta PVsyst.

G. Caso base

Para tener una referencia para realizar la comparativa, se ha diseñado un caso base de instalación fotovoltaica, la cual posee como principal consideración de diseño la producción de energía eléctrica y no existe alguna otra actividad secundaria en el terreno. Se han elegido los sistemas más

simples para el diseño, siendo estos módulos de silicio monocristalino montados sobre el suelo y con un ángulo fijo, ver fig. 6.

Para determinar el ángulo de inclinación a la cual estarán los paneles solares se realiza el siguiente análisis, tomando como base la latitud de 13.51°.

$$\begin{aligned} \beta &= \delta + \phi & (9) \\ \beta &= 3^\circ + 13.51^\circ \\ \beta &= 16.51^\circ \end{aligned}$$

El ángulo de inclinación a la que deben estar los paneles es de 16.51°.

Teniendo calculado el ángulo de inclinación óptimo, se inicia el diseño en PVsyst, utilizando la ubicación elegida y seleccionando la cantidad de módulos de acuerdo con el tipo de montaje y el área disponible.

La potencia nominal es calculada por Pvsyst a partir del área de terreno disponible, el área de los módulos es menor al área del terreno seleccionado, esto se debe al espaciamiento entre filas, ver fig. 7. Los datos obtenidos de la simulación son utilizados para la comparativa.

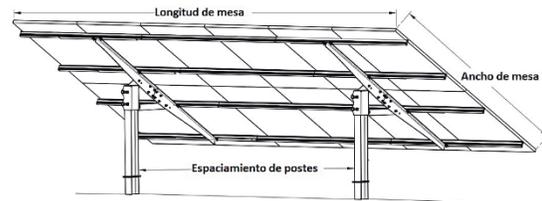


Fig. 6. Sistema de montaje de los módulos solares

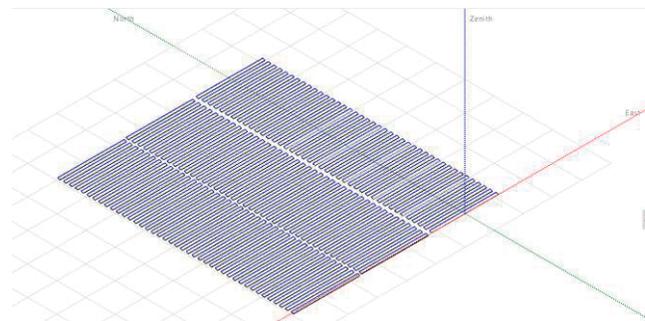


Fig. 7. Distribución de los módulos solares

H. Sistema agrovoltaico, módulos fijos elevados

El segundo caso de diseño se realiza bajo la perspectiva ecovoltaica, teniendo como principal objetivo darle un doble uso al área de terreno disponible, siendo la actividad principal la agricultura y la actividad secundaria la producción de energía eléctrica. Para lograr el objetivo de no afectar las actividades agrícolas se han realizado cambios respecto a la

distribución, número de módulos y altura de éstos, con respecto al caso base, se tuvo como principales consideraciones reducir el número de módulos, para que éstos cubrieran una menor área produciendo menos sombra, y como segunda consideración, el espaciamiento entre filas y altura de módulos debe ser tal que permita las actividades agrícolas, ya sean de sembrado, recolección, cosecha, entrada de maquinaria, etc.

Se han ubicado los módulos longitudinalmente y se ha usado un módulo individual como ancho de fila, ver fig. 8. Ya que se trata de módulos fijos, se utiliza el mismo ángulo óptimo del caso base y el número de módulos se redujo a la mitad.

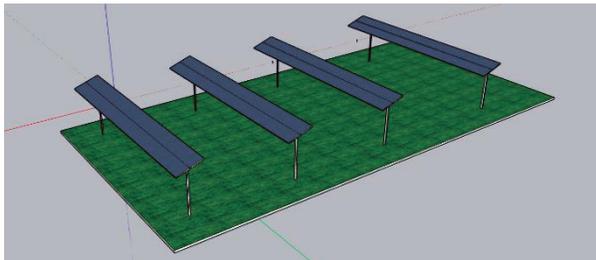


Fig. 8. Representación a detalle del montaje y espaciamiento de los módulos solares

El diseño se basó en el modelo Heggelsbach de proyectos agrovoltaicos de Alemania, según [14], esta forma de ubicar los módulos se centra en la producción agrícola, y se puede usar con variedad de cultivos, combinando cultivos tolerantes a la sombra como hortalizas de raíz (zanahoria, remolachas y papas) y cultivos que crecen mejor bajo luz solar directa como leguminosas, chile, tomate y otros, además de poder sembrar monocultivos como el trigo y el maíz. Para este diseño se toma como base un sistema fotovoltaico fijo montado en el suelo, luego se triplica la separación normal entre filas y se elevan las mesas tres metros.

I. Sistema agrovoltaico, módulos con seguimientos elevados

A diferencia del segundo caso se evalúa la factibilidad de un sistema fotovoltaico con seguimiento de dos ejes para poder tener una mayor producción de energía con respecto al segundo caso, véase fig. 9, que es un diseño de mesa fija. Para que se pueda cultivar el área debajo de los módulos solares se ha escogido como cultivo el café de sombra, la cual favorece al tamaño del fruto, ya que permite que permanezca adherido al árbol por más tiempo, con lo cual aumentará el contenido de sacarosa y se generará una acidez agradable, ambas características precursoras del aroma, que es el principal atractivo del café [15].

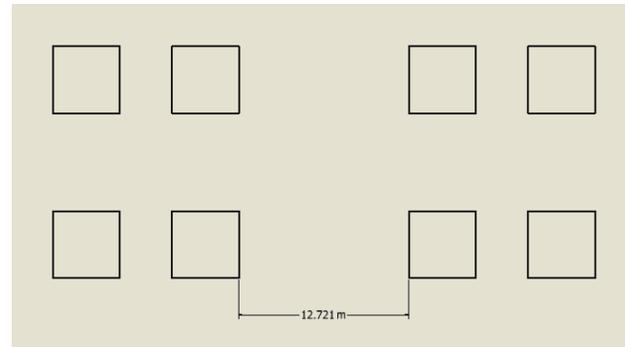


Fig. 9. Distancia entre secciones de paneles solares caso #3

Para el tercer caso se escogió un sistema con seguimiento de dos ejes, distribuidos dos grupos de 10 filas cada uno, distanciadas entre sí lo suficiente para permitir el desarrollo del cultivo del café y permitir actividades como la siembra, cosecha y recolección de este, ver fig. 10.

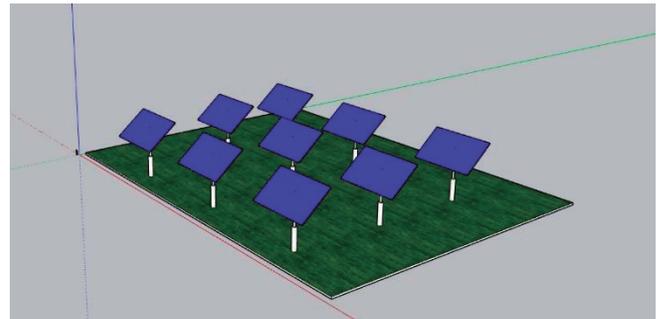


Fig. 10. Representación a detalle del montaje y espaciamiento de los módulos solares para el caso #3

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la simulación de los diseños trabajados, se hicieron las siguientes consideraciones para ser utilizadas en la simulación:

Tabla 2. Parámetros de los sistemas fotovoltaicos

	Caso base	Caso #2	Caso# 3
Ángulo de inclinación	16.5°	16.5°	N/A
Área de los módulos (m ²)	14467	6990	6969
Potencia nominal (kWp)	2995	1447	1378
Potencia de los módulos (Wp)	450	450	440
Cantidad de módulos	6656	3216	3132
Potencia de los inversores (kWac)	125	125	1000
Cantidad de inversores	20	10	2

Para obtener los parámetros necesarios para comparar los tres sistemas, se siguió utilizando la herramienta Pvsyst, con lo cual se obtuvieron los datos de producción energética, ver tabla 3.

Tabla 3. Producción energética de los sistemas

	Caso base	Caso #2	Caso# 3
Producción del sistema (MWh/año)	5451	2625	3066
Producción específica (kWh/kWp/año)	1820	1814	2225
Pérdidas del arreglo (kWh/kWp/día)	0.93	0.95	1.68
Pérdidas del sistema (kWh/kWp/día)	0.07	0.06	0.11

Se tiene otra forma de comparación para los tres sistemas con los indicadores agrovoltaicos, ver tabla 4, los cuales son relevantes al momento de valorar cuantitativamente las sinergias que existen al tener como actividad secundaria la producción eléctrica en un terreno agrícola.

Tabla 4. Indicadores agrovoltaicos

Indicador	Caso base	Ecovoltaico fijo	Ecovoltaico con seguimiento
Relación de cobertura del suelo	0.923	0.436	0.318
Rendimiento energético	3,406.87 MWh/ha	1640.625 MWh/ha	1400 MWh/ha
LER _{Y,el}	N/A	0.4815	0.562

Al calcular los indicadores agrovoltaicos para el caso base, se puede observar que el valor alto de relación de cobertura del suelo de 0.923 (cercano a 1), indica una alta producción de energía por unidad de área, mientras que, si existiese producción de cultivos, ésta se vería disminuida por la reducción de la radiación solar que llega al suelo.

Para poder comparar los casos en el aspecto económico, se ha realizado un desglose de componentes y el costo que tiene cada uno, ver tabla 5. Se han considerado las partes que mayor porcentaje abonan al costo total del sistema, se han omitido aspectos como mano de obra, cableado y permisos.

Tabla 5. Costo de componentes de los sistemas fotovoltaicos

Componente s	Módulos	Inversores	Sistema de montaje	Total
Sistemas				
Caso base	\$1,486,883	\$105,799	\$657,248	\$2,249,932
Ecovoltaico fijo	\$718,422	\$52,899	\$250,324	\$1,021,646
Ecovoltaico con seguimiento	\$733,483	\$285,232	\$570,464	\$1,668,800

Utilizando PVsyst, se calculan las toneladas de CO₂ que se dejan de producir al inyectar energía a la red, ver tabla VI, basándose en datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA) para El Salvador, asimismo, se toman en cuenta las emisiones del ciclo de vida de cada componente del sistema.

Tabla 6. Toneladas de CO₂ ahorradas

	Caso base	Caso #2	Caso #3
Toneladas de CO ₂ ahorradas en 30 años	31360.706	12321.474	1434.643

Considerando que la cantidad de CO₂ que se deja de producir teniendo este sistema es la mitad del caso base, el principal propósito y ventaja de este diseño es tener un mejor aprovechamiento de las tierras, adaptando el diseño a actividades de producción primaria como agricultura y ganadería.

A. Indicadores agrovoltaicos

Los principales indicadores obtenidos con los que se pueden comparar los sistemas son, la relación de cobertura del suelo y el rendimiento energético.

Se generó una gráfica comparativa entre los dos indicadores anteriormente mencionados. Como se puede observar en la fig. 11 para ambos sistemas diseñados bajo la perspectiva ecovoltaica, los dos tienen una relación de cobertura del suelo menor relativa al caso base, lo que indica que ambos sistemas son más apropiados para la actividad agrícola por el mayor paso de radiación solar al suelo. Por otro lado, el rendimiento energético también es menor para ambos sistemas ecovoltaicos.

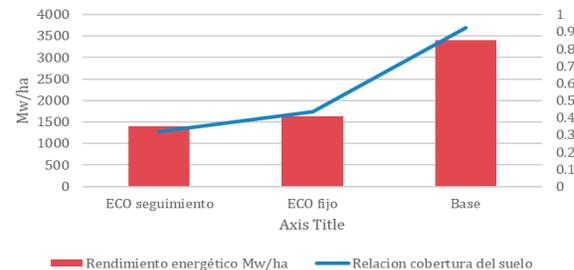


Fig. 11. Comparativa entre cobertura del suelo y producción eléctrica

B. Comparativa económica

Para comparar los tres sistemas diseñados, se ha tomado el costo de los componentes y qué tanto aportan estos al costo inicial de la instalación, para poder evaluar la conveniencia de cada diseño. Además, se ha calculado con Pvsyst el periodo en el que se recuperará la inversión solamente de los componentes, ya que no se cuenta con datos para costos de mano de obra o permisos que requiera el sistema. Se ha investigado de las tarifas eléctricas de la distribuidora que opera en el municipio seleccionado para los proyectos fotovoltaicos, ver tabla 8. Según la Superintendencia General de Electricidad y Comunicaciones, en el municipio de Tecoluca opera DELSUR y la tarifa eléctrica sería de 0.148829\$ y para calcular costos de mantenimiento, se ha tomado un valor base de USD 7.15 por kWp de potencia instalada [16].

Tabla 7. Parámetros económicos de los sistemas

	Caso base	Caso #2	Caso #3
Costos de instalación (USD)	2,249,932.49	1,021,647.04	2,957,627.08
Costo total anual (USD)	12,300.00	10,150.00	10,060.00
LCOE(USD/kWh)	0.023	0.023	0.003
Tiempo de retorno de inversión (años)	4.2	4.1	10

Al realizar los cálculos, se pudo visualizar que la instalación ecovoltaica con seguidores tiene un periodo de retorno de la inversión bastante mayor comparado con el de los otros diseños, ver fig. 12. A continuación, se muestra el aporte económico de cada componente del sistema fotovoltaico al costo total de la instalación.

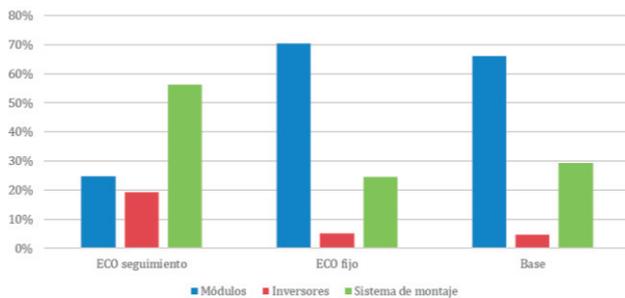


Fig. 12. Gráfico del aporte de componentes al costo total de la instalación

Como se puede observar, en el sistema ecovoltaico con seguimiento, el sistema de montaje y seguimiento contribuye a más del 50 % del costo total. También, en la simulación se encontró que, teniendo la misma cantidad de módulos con un ángulo fijo, la producción energética anual del sistema con seguimiento sería solo un 16.8 % mayor.

C. Comparativa de impactos ambientales

Para determinar los impactos ambientales de los tres casos se utilizó la metodología planteada anteriormente de Determinación del Impacto Medio Ambiental. Esta comparativa es cualitativa y se realizó contrastando los casos planteados, ver tabla 8 y 9.

Como primer punto de comparación son los componentes químicos que son utilizados para la creación de los paneles solares, la limpieza de ellos y el cableado de la planta:

Tabla 8. Impacto ambiental de materiales y componentes químicos

Materiales	Caso #1 (base)	Caso #2 (Ecovoltaico ángulo fijo)	Caso #3 (Ecovoltaico con seguimiento)
Materiales utilizados para la manufactura de los paneles solares:	Por ser la planta con mayor cantidad de paneles solares (6656 paneles), siendo casi el doble que las	Esta alternativa posee aproximadamente la mitad de paneles que el caso base (3216 paneles), por lo que el impacto	El caso de la instalación con seguimiento posee casi la misma cantidad que el caso #2 (3132 paneles),

Materiales	Caso #1 (base)	Caso #2 (Ecovoltaico ángulo fijo)	Caso #3 (Ecovoltaico con seguimiento)
Amonio, Arsénico, Cadmio, Cromo, Hidrogeno, Silicio, Hexafluoruro de azufre.	otras alternativas, causaría el mayor impacto ambiental debido a la cantidad de materiales que se utilizan para su manufactura y la cantidad de paneles que se deben desechar al final de su vida útil.	ambiental causado por estos materiales, tanto en la manufactura como en su proceso de recuperación de recursos, se vería reducido significativamente.	por lo que su impacto ambiental sería similar.
Acetona, Isopropanol, agua:	De igual manera este caso causaría el mayor impacto ambiental para la limpieza de los paneles solares.	Este caso tendría una reducción del impacto ambiental significativa por tener una menor cantidad de paneles, comparado con el caso base.	El impacto del caso con seguimiento es similar al caso #2, con la diferencia que podría necesitar un poco más de trabajo debido a la altura de los marcos de los paneles.

La fase que produce el mayor impacto ambiental de una planta fotovoltaica es la instalación y utilización del terreno, por eso a continuación se hace una comparativa entre los tres casos analizados:

Tabla 9. Comparativa de impacto ambiental en sitio

Impacto ambiental	Caso #1 (base)	Caso #2 (Ecovoltaico ángulo fijo)	Caso #3 (Ecovoltaico con seguimiento)
Uso de la tierra	En términos de uso de espacio para la instalación fotovoltaica este sería el más eficiente, ya que los paneles se encuentran más cerca unos de otros, dejando el menor espacio posible entre ellos.	En el caso de la planta ecovoltaica el uso de la tierra es mayor por el espacio que se debe dejar, pero este terreno ya no se utilizará exclusivamente para generar energía, por lo que otros impactos se ven reducidos que se mencionarán posteriormente.	La planta con seguimiento sería la que utiliza la mayor cantidad de espacio, debido a la separación que tienen los paneles a causa de su altura. Pero de igual manera que el caso #2, este espacio no es utilizado exclusivamente para generar energía.
Reducción de áreas cultivos	Aun cuando este tipo de planta utiliza una menor cantidad de tierra, el espacio	Este es uno de los impactos que se ven reducidos por la implementación de la	El caso con seguimiento es el que menor impacto tiene, ya que se tiene mayor

Impacto ambiental	Caso #1 (base)	Caso #2 (Ecovoltaico ángulo fijo)	Caso #3 (Ecovoltaico con seguimiento)	Impacto ambiental	Caso #1 (base)	Caso #2 (Ecovoltaico ángulo fijo)	Caso #3 (Ecovoltaico con seguimiento)
	utilizado es solo para generar energía, por lo que la reducción de área de cultivo es la más significativa de los tres casos.	ecovoltaica, ya que como se mencionaba anteriormente el espacio de los módulos puede seguir siendo utilizado para cultivos, ya sea debajo de los paneles o en el espacio entre ellos.	separación entre los paneles y un mayor distanciamiento con respecto al suelo, dejando un mayor espacio debajo de las estructuras.		tiene el mayor impacto por la cantidad de paneles que se tiene y la falta de medios para controlar el impacto de otras formas.	poseen formas para combatir los cambios en el microclima, como por ejemplo la vegetación ayuda a controlar la temperatura de los paneles.	al caso #2.
Fragmentación del campo y degradación de vegetación	Debido a que el uso del terreno se maximiza para obtener la mayor potencia, esto genera una fragmentación del campo donde habrá sectores que no serán aprovechados y la vegetación se vería eliminada en su totalidad.	A diferencia de una planta convencional, siempre existirá fragmentación del campo, pero sería para la combinación de generación de energía y el desarrollo de actividades que puedan beneficiar el entorno.	Este caso tiene un impacto similar al caso #2, con la diferencia que se tiene mayor espacio para las actividades que pueden beneficiar el entorno.	Destello	Por la cantidad de paneles que se tienen, esta tendría el mayor impacto al tener más superficies donde reflejar la luz.	La planta ecovoltaica tendría un menor impacto al ser menos paneles que en el caso convencional.	El impacto de la planta con seguimiento sería un poco mayor que la ecovoltaica fija ya que se tiene una mayor elevación de los paneles, teniendo un mayor potencial de causar destellos.
Impacto visual en el paisaje	Este caso es el que tiene un mayor impacto, ya que se destruye completamente el paisaje del terreno donde se hace la instalación.	El caso ecovoltaico con paneles fijos sería el que tiene el menor impacto de los tres casos, ya que existe mayor espacio para vegetación entre los paneles y la altura de los mismos es menor que en el caso de seguimiento, por lo que son menos visibles y no se modifica tanto el terreno. La planta ecovoltaica intenta	El caso con seguimiento tiene un impacto menor que el caso base, pero uno mayor que el caso #2, porque tiene un mayor espacio entre paneles, pero estos resaltan más por su mayor altura, causando que sean más visibles.	Impactos de la fase de construcción	La instalación convencional tiene el mayor impacto ya que no se busca preservar el terreno más de lo necesario y se tiene que instalar una mayor cantidad de estructuras para los paneles.	Para la planta ecovoltaica se busca afectar lo menor posible la flora y fauna del lugar y se tiene una menor cantidad de paneles por lo que no se instalan tantas estructuras.	El impacto es un poco mayor que la ecovoltaica fija ya que la estructura de los paneles con seguimiento necesita una instalación más profunda, modificando más el terreno.
Interferencia con la flora y fauna	Tiene el mayor impacto ya que la flora y fauna que se elimina para la instalación no se ve reemplaza de ninguna manera para conservarla.	preservar la vegetación del lugar al plantar en los espacios entre los paneles y debajo de ellos. De igual manera se busca que la instalación no cause problemas para la fauna.	Tendría un impacto similar al caso #2.				
Cambio en el microclima	En una planta convencional se	En la planta ecovoltaica se	Tendría un impacto similar				

D. Fortalezas y debilidades

1. *Caso #1: sistema fotovoltaico de mesa fija diseñado solo para la generación de electricidad:* El sistema fotovoltaico convencional presenta fortalezas como una mayor producción de energía para una determinada área, esto se debe principalmente a que solo se tiene una aplicación para el uso del suelo por lo tanto el espacio designado se aprovecha completamente para colocar la mayor cantidad de módulos solares posibles y consecuentemente la potencia instalada del sistema fotovoltaico es mayor con respecto a los otros dos casos. Lo anterior repercute también en una fortaleza desde la arista económica para el inversionista al tener en cuenta lo siguiente: una mayor producción de energía se ve reflejado como mayores ingresos monetarios por inyección a la red conectada. La debilidad principal para este caso radica en el impacto ambiental que tiene un diseño de esta envergadura por la degradación del suelo que se ocasionará debajo de los módulos al tener una sombra permanente debajo de estos y por lo tanto afectando el ecosistema de la región, al tener la mayor cantidad de

módulos significa también un aumento en la cantidad de desechos que se producirán al final de la vida útil de los mismos.

2. *Caso #2: sistema fotovoltaico ecovoltaico de mesa fija para cultivo de la tierra:* Para el caso del sistema fotovoltaico de ángulo fijo elevados a una altura de 3 m para permitir cultivos debajo de los módulos y suficientemente espaciados entre ellos la fortaleza radia en el aprovechamiento de la tierra para dos actividades distintas: la producción de energía y cultivar la tierra para obtener ingresos por medio de otra fuente, como lo es la agricultura. Usar una misma área para desarrollar dos actividades como las descritas ayuda a reducir el impacto medioambiental de los sistemas fotovoltaicos convencionales debido a que busca un equilibrio con el sistema donde se planea diseñar y así mitigar la modificación de la región por los requerimientos durante la etapa de la adecuación del suelo para instalar los módulos. Su debilidad se hace notoria cuando se comienzan a ver aspectos económicos porque al tener menor cantidad de módulos, y por lo tanto de potencia instalada, para que los cultivos se puedan desarrollar significará menores ingresos con respecto a la venta de energía inyectada para una misma tarifa con respecto al caso base donde se produciría electricidad.

3. *Caso #3: sistema fotovoltaico ecovoltaico con seguimiento de dos ejes para cultivo de café:* La fortaleza del sistema fotovoltaico con módulos con sistema de seguimiento de dos ejes y con un cultivo de sombra como el café es que al aprovechar la radiación solar para distintos momentos del día para la generación de electricidad es mayor la producción de energía para un número similar de módulos con respecto al caso #2 que son de ángulo fijo, asimismo representaría más ingresos por generación de electricidad por tener más potencia instalada siempre que el caso #2 también que se verá reducido el impacto ambiental por buscar igualmente formas para mitigar la región donde se instalaría el sistema fotovoltaico. La debilidad también está presente en el aspecto económico porque el sistema de seguimiento es más costoso que el de ángulo fijo y por lo tanto la inversión inicial será mayor para este escenario, asimismo el período de retorno se incrementará y podría ser poco llamativo para los inversionistas este sistema. Es importante recalcar que por al involucrar componentes mecánicos móviles como el sistema de seguimiento se requiere de un mantenimiento más caro que para los de sistema fijo y además de un servicio especializado para garantizar su buen funcionamiento.

IV. CONCLUSIONES

El incremento de la demanda de generación eléctrica con energía solar conducirá a un aumento de la disputa por el uso de los suelos, y como consecuencia un posible conflicto económico, ecológico, social y político en el futuro cercano. Los sistemas ecovoltaicos proveen una solución para el uso sostenible de las tierras en términos de producción de

alimentos y generación de energía eléctrica. Se ha determinado que los sistemas ecovoltaicos incrementan la eficiencia del uso del suelo permitiendo actividad agrícola o ganadera y la generación eléctrica en la misma área mientras se aprovechan las sinergias tecno-ecológicas y económicas de ambos sistemas de producción.

Según la revisión bibliográfica y los resultados obtenidos de la comparativa de sistemas fotovoltaicos, el parámetro de diseño de mayor importancia para la actividad complementaria a la generación de energía es la ubicación espacial de los módulos y su sistema de montaje, de este aspecto dependen factores como: radiación solar que llega al suelo, evaporación de agua, paso de maquinaria agrícola, paso de ganado, etc. Y finalmente, todos los factores anteriormente mencionados son críticos para actividades como la ganadería y agricultura.

Establecer una metodología cuantitativa para determinar el impacto ambiental de una instalación fotovoltaica resulta difícil debido a que no se puede contar con toda la información necesaria de los agentes involucrados. Debido a eso, el análisis se centró en el estudio cualitativo del uso de la tierra y como esto impacta en la flora, fauna, paisaje y microclimas del ecosistema, lo que permitió establecer criterios que evalúan el impacto en cada uno de los parámetros y establecer acciones que pueden influir a la reducción de estos para lograr que la planta fotovoltaica sea considerada bajo el concepto de la ecovoltaica.

Al observar la comparativa realizada de los impactos ambientales entre los casos planteados se puede concluir que la instalación que posee un mayor impacto es la instalación tradicional. Esto sucede porque las instalaciones ecovoltaicas se enfocan en reducir estos impactos ambientales a lo largo de todo el proceso de creación de la planta. En relación a los dos casos de instalaciones ecovoltaicas, el caso que posee una leve ventaja en la reducción de los impactos ambientales es la de seguimiento, ya que en la mayoría de los aspectos reduce de igual o mejor manera el impacto. Principalmente, en la distribución del terreno, ya que se destina una mayor cantidad de espacio para la actividad secundaria a realizar, ya sea ganadería o agricultura.

Realizando el análisis económico de las instalaciones fotovoltaicas, se observó que en el caso #3 sistema agovoltaico con seguimiento, el costo de los seguidores aporta más de un 50 % al costo total de los componentes, el costo total es 2.9 veces el del caso #2 y la potencia pico solo aumenta un 16.8 % también respecto al caso#2, este sistema tiene la única ventaja de tener un bajo índice de cobertura del suelo, sin embargo por lo anterior encontrado resulta difícil seleccionarlo como un diseño viable.

Partiendo de la investigación realizada, se observó que existen oportunidades para reducir impactos ambientales fuera del diseño y operación del sistema ecovoltaico, como darles una buena disposición final a los módulos solares, ya que, a nivel nacional no existen regulaciones, normativas o infraestructura para manejar este aspecto. Por lo cual, se recomienda realizar iniciativas propias o realizar propuestas

a las autoridades para controlar esta parte de la implementación de un sistema ecovoltaico.

En el proceso de diseño de los sistemas ecovoltaicos, estos se evaluaron parcialmente debido a que se dificulta calcular o comparar aspectos de la agricultura de manera cuantitativa. Se recomienda que se tenga una fase experimental de estos sistemas en el caso de la agrovoltaica para finalmente tener la implementación más adecuada de la parte agrícola.

A partir del desarrollo de la guía para diseñar un sistema fotovoltaico bajo la perspectiva ecovoltaica, se notó que, para llevar a cabo un proyecto de este tipo, se necesita un fuerte elemento de gestión de proyectos, debido a que la perspectiva ecovoltaica es interdisciplinaria por el uso de la tierra con doble propósito, tener un sistema de gestión de proyectos asegurará que los intereses y roles de los involucrados estén bien definidos y puedan ser cumplidos satisfactoriamente.

Para la implementación de plantas fotovoltaicas bajo el concepto de la ecovoltaica se recomienda realizar un estudio de suelo antes de definir el tipo de sistema que se utilizará para la generación de energía, ya que de esto depende si se implementara un diseño fijo o por seguimiento. Además, el estudio del suelo y la zona permitirá determinar el tipo de vegetación que se puede cosechar y si es apto para mantener el ganado.

REFERENCIAS

- [1] Energética. (26 de octubre de 2021). Ecovoltaica, plantas solares sostenibles y beneficiosas para su entorno - Solar. Obtenido de Energética21: <https://energetica21.com/noticia/ecovoltaica-plantas-solares-sostenibles-y-beneficiosas-para-su-entorno>.
- [2] IBERDROLA. (5 de abril de 2022). Agrovoltaica | Energía solar y agricultura. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/innovacion/energia-agrovoltaica>.
- [3] Regalado, J. L. (3 de Junio de 2022). Visita Técnica a planta: Renovables El Salvador Uno. (R. Arévalo, J. Campos, C. García, & R. Gómez, Entrevistadores).
- [4] Pathania, N. K. (2020). STRATEGIES AND TECHNIQUES FOR SUSTAINABLE GREENHOUSE VEGETABLE PRODUCTION IN INDIA.
- [5] Toledo, C. &. (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.
- [6] Pringle, A., Handler, R., & Pearce, J. (2017). Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 572-584.
- [7] TNO. (s.f.). RESEARCH INTO THE ECOLOGICAL EFFECTS OF INNOVATIVE SOLAR PARKS. Obtenido de TNO innovation for life: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/renewable-electricity/solar-energy/solar-farm/innovative-solar-parks/>.
- [8] Espitia, C. (2017). Guía Metodológica para la implementación de sistemas fotovoltaicos a pequeña escala en Colombia. Bucaramanga.
- [9] The Fish Site. (28 de julio de 2014). Photovoltaic Applications in Aquaculture: A Primer. Obtenido de The Fish Site: <https://thefishsite.com/articles/photovoltaic-applications-in-aquaculture-a-primer>.
- [10] Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-González, J. J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F. J., & Torregrosa-Soler, J. B. (2013). A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*, 63-70.
- [11] Engi. (22 de Septiembre de. 2020). Obtenido de <https://engi.co/impacto-paneles-solares/>
- [12] Ecologistas en acción. (21 de Junio de 2007). Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/10057/impacto-ambiental/>.
- [13] Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2009). The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2441-2451.
- [14] Zainol Abidin, M. A. (2021). Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review. 13(14), 7846.
- [15] Consejo Salvadoreño del Café et al. (s.f.). Guía Práctica de la Caficultura.
- [16] Hatti, M. (2014). Operation and maintenance methods in solar power plants. Use, Operation and Maintenance of Renewable Energy Systems. 61-93.