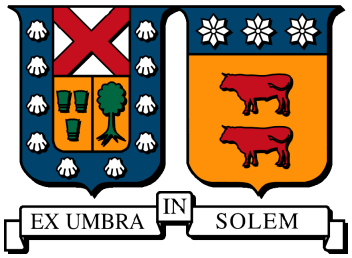
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD Y RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO A NIVEL NACIONAL DE LA TECNOLOGÍA AGRO FOTOVOLTAICA EN CHILE

GABRIEL IGNACIO DURÁN ARANDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : MAURICIO OSSES
PROFESOR CORREFERENTE : FREDERIK SCHÖNBERGER

Mayo 2025

Abstract

Climate change affects Chilean agricultural production, especially in regions with critical water availability, which requires urgent adaptation and mitigation measures. In response, GIZ and Fraunhofer Chile Research propose to promote agro-photovoltaics (AgriPV): a dual land use that integrates agricultural production and solar energy generation, which can provide agricultural benefits by installing photovoltaic (PV) panels on the same land, thus addressing the intersectoral challenges of water, energy and soil. A pre-feasibility analysis and recommendations for the national development of AgriPV technology in Chile are proposed.

The methodology combined: (1) biweekly meetings and face-to-face sessions with three AgriPV experts to define challenges, benefits, barriers and recommendations for the technology; and (2) a technical-economic study that extrapolated the design of the 2.7 [MWp] Piet Albers project (Netherlands) to Chile, comparing its costs with conventional PV projects. In addition, fruit crops suitable for AgriPV were selected for regions with potential based on larger cultivated area.

Based on the methodology described above, the work with experts resulted in a Policy Brief whose recommendations highlight, above all, **the need to legislate to differentiate AgriPV from conventional PV**, a step considered essential by international experience and decisive to enable its benefits in medium and large-scale projects. In terms of agricultural selection, suitable crops were identified: cherry (Metropolitan and O'Higgins Regions), European hazelnut (Ñuble, La Araucanía and Los Lagos) and American blueberry (Biobío and Los Ríos). Moreover, extrapolating from the Piet Albers project confirms that semi-transparent panels can replace shade and hail nets, contributing to a more controlled microclimate and reducing the height of the substructure. Finally, the cost analysis reveals that **this AgriPV system is 36 % more expensive than a conventional PV system**, due to the elevated substructure (+200,000 [USD]) and the semi-transparent panels (+90,000 [USD]).

Thus, it is essential to legislate and financially incentivize AgriPV as a compatible and beneficial facility for agriculture, as it has the potential to promote water and food security, climate resilience and distributed micro electricity generation in the context of climate crisis.

Resumen

El cambio climático afecta la producción agrícola chilena, sobre todo en regiones con disponibilidad hídrica crítica, lo que exige medidas urgentes de adaptación y mitigación. En respuesta, GIZ y Fraunhofer Chile Research proponen impulsar la agrofotovoltaica (AgriPV): un uso dual del suelo que integra producción agrícola y generación de energía solar, pudiendo otorgar beneficios agrícolas al instalar paneles fotovoltaicos (FV) sobre el mismo terreno y abordando así los retos intersectoriales de agua, energía y suelo. Se plantea realizar un análisis de prefactibilidad y recomendaciones para el desarrollo a nivel nacional de la tecnología AgriPV en Chile.

La metodología combinó: (1) reuniones quincenales y sesiones presenciales con tres expertos en AgriPV para definir desafíos, beneficios, barreras y recomendaciones para la tecnología; y (2) un estudio técnico-económico que extrapoló el diseño del proyecto Piet Albers (Países Bajos) de 2,7 [MWp] a Chile, comparando sus costos con proyectos FV convencionales. Además, se seleccionaron cultivos frutícolas idóneos para AgriPV para regiones con potencial según mayor superficie cultivada.

A partir de la metodología descrita, el trabajo con expertos derivó en un *Policy Brief* cuyas recomendaciones destacan, ante todo, **la necesidad de legislar para diferenciar al AgriPV de la FV convencional**, paso considerado esencial por la experiencia internacional y decisivo para habilitar sus beneficios en proyectos de mediana y gran escala. En cuanto a la selección agrícola, se identificaron cultivos idóneos: cerezo (Regiones Metropolitana y O´Higgins), avellano europeo (Ñuble, La Araucanía y Los Lagos) y arándano americano (Biobío y Los Ríos). Por otra parte, el extrapolar el proyecto Piet Albers confirma que los paneles semi-transparentes pueden sustituir mallas de sombra y granizo, contribuyendo a un microclima más controlado y reduciendo la altura de la subestructura. Finalmente, el análisis de costos revela que **este sistema AgriPV resulta ser un 36 % más costoso que un parque FV convencional**, debido a la subestructura elevada (+200.000 [USD]) y a los paneles semi-transparentes (+90.000 [USD]).

De esta manera, es esencial legislar e incentivar financieramente el AgriPV considerándolo como una instalación compatible y beneficiosa para la agricultura, ya que tiene el potencial de promover la seguridad hídrica y alimentaria, la resiliencia climática y la micro generación eléctrica distribuida en contexto de crísis climática.

Objetivo general

Realizar un análisis de prefactibilidad y recomendaciones para el desarrollo a nivel nacional de la tecnología Agrofotovoltaica en Chile.

Objetivos específicos

Luego de definido el objetivo general de este trabajo, se requieren de objetivos específicos para cumplir con este a cabalidad, por lo que se definen a continuación.

Objetivo específico N°1

Identificar y sintetizar diversas tecnologías Agrofotovoltaicas mediante revisión bibliográfica.

Objetivo específico N°2

Extraer conclusiones a partir de políticas internacionales y recomendaciones regulatorias para la posible implementación Agrofotovoltaica en Chile.

Objetivo específico N°3

Seleccionar casos agrícolas representativos en Chile en función de la geografía y sus productos representativos.

Objetivo específico N°4

Analizar el diseño de un sistema Agrofotovoltaico específico con su respectivo análisis de costos.

Índice general

1. Introducción a la agrivoltaica: sistemas agrivoltaicos y su implementación en Chile **2**

1.1. Introducción 2
1.2. Factores climáticos que inciden a la agricultura en Chile 5
1.2.1. Temperatura 5
1.2.2. Precipitaciones 9
1.2.3. Radiación solar 13
1.2.4. Crisis climática 14
1.2.5. Impacto en agricultura 16
1.3. Aspectos agrícolas en AgriPV 18
1.3.1. Microclima 19
1.3.2. Investigaciones 19
1.3.3. Cultivos adecuados 23
1.4. Sistemas AgriPV y sus tecnologías 26
1.4.1. Tecnología de módulos FV 26
1.4.2. Tecnología de la subestructura 29
1.4.3. Fundación de la subestructura 30
1.4.4. Maquinaria agrícola 31
1.5. Síntesis 32
1.5.1. Potencial del AgriPV en Chile 32

2. Revisión de políticas internacionales y recomendaciones para la implementación de la agrivoltaica en Chile **36**

2.1. Metodología 37
2.2. Desafíos intersectoriales y AgriPV 38

2.2.1. Desafíos agrícolas . . . 38
2.2.2. Desafíos del sector energético en la transición energética . . . 39
2.2.3. Desafíos para los sistemas AgriPV . . . 40
2.3. Revisión de políticas y regulaciones internacionales . . . 41
2.3.1. Alemania . . . 41
2.3.2. Italia . . . 45
2.3.3. Japón . . . 47
2.3.4. Francia . . . 48
2.3.5. USA . . . 55
2.3.6. China . . . 57
2.4. Conclusiones y recomendaciones para la regulación del AgriPV en Chile 59
2.4.1. Marco jurídico . . . 59
2.4.2. Incentivos financieros . . . 64
2.4.3. Red de actores . . . 67

3. Caso de análisis de proyecto AgriPV existente y su respectivo análisis de costos 68
3.1. Introducción . . . 68
3.2. Metodología . . . 69
3.2.1. Selección de proyecto AgriPV existente . . . 69
3.2.2. Análisis de diseño del proyecto seleccionado . . . 69
3.2.3. Análisis de costos: proyecto AgriPV . . . 73
3.2.4. Selección de casos agrícolas representativos para el AgriPV en Chile . . . 75
3.3. Resultados . . . 77
3.3.1. Selección de proyecto AgriPV existente . . . 77
3.3.2. Estimar parámetros de diseño: proyecto Piet Albers . . . 78
3.3.3. Análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV Piet Albers a la realidad chilena . . . 85
3.3.4. Análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers . . . 90
3.3.5. Selección de casos agrícolas representativos para el AgriPV en Chile . . . 95
3.4. Discusión y conclusiones . . . 99
3.4.1. Discusión de análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV Piet Albers a la realidad chilena . . . 99

3.4.2. Discusión de análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers . . 101
3.4.3. Conclusiones 104
3.4.4. Recomendaciones 106

4. Conclusiones y recomendaciones 110
4.1. Conclusiones generales 110
4.1.1. Experiencia internacional en AgriPV 111
4.1.2. Análisis de prefactibilidad para el AgriPV en Chile 112
4.1.3. Recomendaciones para el desarrollo del AgriPV en Chile 118
4.2. Conclusiones específicas 128
4.2.1. Identificar y sintetizar diversas tecnologías agrofotovoltaicas mediante revisión bibliográfica 128
4.2.2. Extraer conclusiones a partir de políticas internacionales y recomendaciones regulatorias para la posible implementación Agrofotovoltaica en Chile 131
4.2.3. Seleccionar casos agrícolas representativos en Chile en función de la geografía y sus productos representativos 139
4.2.4. Analizar el diseño de un sistema Agrofotovoltaico específico con su respectivo análisis de costos 142

A. Revisión de políticas internacionales y recomendaciones para la implementación de la agrivoltaica en Chile 161

B. Caso de análisis de proyecto AgriPV existente y su respectivo análisis de costos 187

Índice de figuras

1.1. Sistema AgriPV de 8,7 [MWp] con cultivo de bayas por parte de © BayWa r.e [1]. 3
1.2. Sistema AgriPV con soporte elevado y altura libre. Créditos: GIZ. . . . 4
1.3. Sistema AgriPV con cultivo entre hileras. Créditos: Thomas Hickey. . . 4
1.4. Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 126 estaciones de medición a lo largo del país. La línea segmentada gris indica la tendencia lineal [2]. 6
1.5. Tendencias en [°C] por década de la temperatura media. Círculos azules indican tendencias negativas (más frío) y círculos rojos indican tendencias positivas (más cálido) [2]. 7
1.6. Mapas de cambio de temperatura ([°C], anual) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores) [3]. 8
1.7. Precipitación total anual utilizando de 200 estaciones de medición a lo largo del país para Chile continental en milímetros y línea segmentada de tendencia lineal [2]. 9
1.8. Mapas con las tendencias en [mm/década] de la precipitación a) anual y b) estacionales. Los círculos verdes y azules indican tendencias positivas es decir "tendencia ser más lluvioso", mientras que los cafés tendencias negativas "tendencia a ser más seco" [2]. 10
1.9. Mapas de cambio de precipitación (%, anual) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm. [3]. 11

1.10. Mapas de cambio de precipitación (%, invierno) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm. [3]. 12
1.11. Promedio Anual del índice del Anticiclón del Pacífico Sur hasta el año 2017, las barras rojas indican presencia del fenómeno de La Niña, mientras que las barras azules la presencia del fenómeno de El Niño [4]. 15
1.12. Número de olas de calor registradas por año en Santiago de Chile [5]. . 16
1.13. Proyecto piloto AgriPV por parte de Fraunhofer Chile Research. Imagen: Franhofer Chile Research. 23
1.14. Ilustración de cómo las plantas pueden aprovechar más luz para la fotosíntesis cuando aumenta la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Los puntos indican los puntos de saturación de luz, y por encima de estos valores, luz adicional no aumenta la fotosíntesis [6]. 25
1.15. Ilustración de los tres módulos principales c-Si utilizados en AgriPV [7]. 27
1.16. Sistema AgriPV con paneles semi-transparentes elevados para producción de bayas © BayWa r.e. [8]. 28
1.17. Tecnologías de seguimiento solar presente en las subestructuras de sistemas PV [9]. 30
1.18. Tipos de fundaciones reversibles para la subestructura de un sistema AgriPV. 31

2.1. Gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola, traducido de ADEME [10]. 54

3.1. Principales parámetros ajustables para el diseño de un sistema AgriPV tipo aéreo. Cortesía de Fraunhofer Chile Research. 70
3.2. Imagen utilizada para obtener una referencia de altura hacia el sistema [11]. 78
3.3. Frambueso creciendo debajo de paneles semi-transparentes en proyecto Piet Albers [12]. 79
3.4. Largo estimado del módulo semi-transparente utilizado en proyecto Piet Albers [13]. 80
3.5. Ancho estimado del módulo semi-transparente utilizado en proyecto Piet Albers [12]. 80

3.6. Proyecto Piet Albers finalizando su fase de construcción [14]. 81
3.7. Estructura AgriPV de proyecto Piet Albers durante su fase de construcción [13]. 81
3.8. Ángulo de inclinación estimado [12]. 82
3.9. Distancias estimadas al suelo desde distintos puntos de referencia [13]. . 82
3.10. Distancias estimadas de parámetros constructivos de interés general [13]. 83
3.11. Distancia de paso estimada representada en el sistema (Dentro de la estructura AgriPV) [15]. 84
3.12. Distancia de paso estimada representada en el sistema (Fuera de la estructura AgriPV) [16]. 85
3.13. Marco general de plantación de frambueso en Chile, créditos a Marina Gambardella y a INDAP [17]. 89
3.14. Configuración de distintos modelos de negocio AgriPV donde interactúan entidades como: propietario de terreno, agricultor, inversores FV y operador FV [18]. 108

4.1. Configuración de distintos modelos de negocio AgriPV donde interactúan entidades como: propietario de terreno, agricultor, inversores FV y operador FV [18]. 125
4.2. Marco general de plantación de frambueso en Chile, créditos a Marina Gambardella y a INDAP [17]. 144
4.3. Distancia de paso estimada representada en el sistema AgriPV Piet Albers (Dentro de la estructura AgriPV) [15]. 145

A.1. Gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola, traducido de ADEME. 162

Índice de tablas

1.1. Comparación de parámetros ambientales y de rendimiento de cultivos en diferentes condiciones: (1) directamente debajo de los paneles solares, (2) en filas entre paneles, (3) en un área de control lejos de los paneles [19]. 21

2.1. Resumen de categorías y formas de uso de la tierra según lo establecido en DIN SPEC 91434 43

3.1. Clasificación de costos para proyectos FV convencionales con categorías y sub-categorías. 74
3.2. Proyectos AgriPV seleccionados. 77
3.3. Superficie de cultivo de frambuesas por región según los últimos catastros de superficie frutícola regional. 86
3.4. Datos específicos FV del proyecto Piet Albers y de las regiones representativas del cultivo de frambuesa. Se incluye comparación porcentual de la Potencia FV específica por localidad, tomando a Babberich, Países Bajos como referencia. Datos obtenidos mediante Global Solar Atlas [20]. 87
3.5. Base de costos representativos para los proyectos FV convencionales (Base-PV) con su respectivo porcentaje del total. 90
3.6. Base-PV y Base-APV con su porcentaje de aumento a partir de Base-PV. 91
3.7. Casos de variación en la estimación de Base-APV en un -25 % (VAR(*-25 %)) y -10 % (VAR(*-10 %)), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 92
3.8. Casos de variación en la estimación de Base-APV en un 10 % (VAR(*10 %) y 25 % (VAR(*25 %), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 93

3.9. Casos de variación en la estimación de Base-APV, sólo modificando la Subestructura en un 50 % (VAR(Substr.*50 %) y 100 % (VAR(Substr.*100 %)) de aumento respecto a Base-PV; todo esto con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 94

3.10. Cultivos frutícolas representativos por región según mayor superficie cultivada según último catastros de superficie frutícola para cada región [21]. 95

3.11. Generalidades de interés de cultivos frutícolas más representativos de Chile (Entre la región de Coquimbo y Los Lagos): Superficie total cultivada, rango de altura y requerimiento lumínico. 96

3.12. Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV, con su respectiva superficie cultivada en la región. 98

4.1. Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV y propuestos para investigación AgriPV con paneles semi-transparentes. 124

4.2. Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV, con su respectiva superficie cultivada en la región. 140

4.3. Generalidades de interés de cultivos frutícolas más representativos de Chile (Entre la región de Coquimbo y Los Lagos): Superficie total cultivada, rango de altura y requerimiento lumínico. 141

4.4. Datos específicos FV del proyecto Piet Albers y de las regiones representativas del cultivo de frambuesa. Se incluye comparación porcentual de la Potencia FV específica por localidad, tomando a Babberich, Países Bajos como referencia. Datos obtenidos mediante Global Solar Atlas [20]. 144

4.5. Base-PV y Base-APV con su porcentaje de aumento a partir de Base-PV. 146

4.6. Casos de variación en la estimación de Base-APV en un -25 % (VAR(*-25 %)) y -10 % (VAR(*-10 %)), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 147

4.7. Casos de variación en la estimación de Base-APV en un 10 % (VAR(*10 %) y 25 % (VAR(*25 %), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 148

4.8. Casos de variación en la estimación de Base-APV, sólo modificando la Subestructura en un 50 % (VAR(Substr.*50 %) y 100 % (VAR(Substr.*100 %)) de aumento respecto a Base-PV; todo esto con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV. 149

B.1. Perfil de costos realizado a partir de cinco proyectos de FV convencional. 188

Capítulo 1

Introducción a la agrivoltaica: sistemas agrivoltaicos y su implementación en Chile

1.1. Introducción

La agricultura desempeña un papel esencial en la sociedad al abastecer a la población con diversos tipos de frutas, verduras y cereales para satisfacer sus necesidades alimentarias. Sin embargo, a nivel mundial, los sistemas alimentarios se enfrentan a vulnerabilidades relacionadas con los cambios climáticos, tanto proyectados como actuales, donde en particular existen alteraciones en los patrones de precipitación y el aumento de la temperatura del aire [22]. En respuesta a estos desafíos, la agricultura ha implementado diversas medidas de protección de cultivos, como el uso de invernaderos, túneles de aluminio y redes para proteger las cosechas de granizo, así como mallas que protegen a cultivos de la radiación extrema. Además, en regiones áridas, se ha recurrido al riego excesivo para mantener el cultivo de alimentos que no son naturalmente adaptables a suelos secos [23]. **Para lograr una agricultura sostenible, es esencial esforzarse por utilizar el agua de manera eficiente sin mermar la búsqueda de mejores rendimientos**. En estos campos es que la agrofotovoltaica pareciera ser una solución para este complejo panorama.

La agrofotovoltaica, agrivoltaica o AgriPV[1] es en esencia agricultura, donde gracias a sinergias y diversas configuraciones **permite la producción agrícola en conjunto con la generación de energía limpia dentro de un mismo terreno**, logrando el uso dual de las tierras de cultivo. Dentro de las sinergias utilizables, se puede disminuir el uso de agua de riego [24], incrementar rendimientos en diversos cultivos según el clima [25] y la protección de cultivos frente a fenómenos climáticos adversos.

En la Figura 1.1 se puede observar la implementación agrivoltaica para un cultivo de bayas, en la cual el diseño se centra en la protección del cultivo.



Figura 1.1: Sistema AgriPV de 8,7 [MWp] con cultivo de bayas por parte de © BayWa r.e [1].

Una manera de categorizar los sistemas AgriPV es:

Sistemas agrivoltaicos con soporte elevado y altura libre: Son sistemas agrivoltaicos aéreos donde los módulos PV se distribuyen por encima de los cultivos. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de este tipo de distribución. Se puede notar que la disposición de los paneles PV implica la existencia de soportes que otorgan altura a dicho cultivo, este tipo de disposición suele tener sistemas sistemas de seguimiento solar y en ciertos casos, sistemas de gestión de agua lluvia.

Sistemas agrivoltaicos con cultivos entre hileras: Son sistemas agrivoltaicos con hileras de módulos PV ubicadas entre los cultivos. En la Figura 1.3 se muestra un

[1]De ahora en adelante se utilizará el término agrivoltaica y AgriPV (su acrónimo), debido a que en la práctica internacional estos términos son los más usados, por lo que se infiere como los más correctos.

ejemplo de este tipo de sistema. Este tipo de sistema posee paneles que pueden estar fijos, verticales o tener sistemas de seguimiento solar.

En ambos casos, el diseño del sistema AgriPV debe ser acorde al cultivo existente, así mismo como a la maquinaria utilizada para el tratamiento del cultivo.



Figura 1.2: Sistema AgriPV con soporte elevado y altura libre. Créditos: GIZ.



Figura 1.3: Sistema AgriPV con cultivo entre hileras. Créditos: Thomas Hickey.

En el AgriPV, uno de los objetivos principales consiste en mantener o aumentar el rendimientos de los cultivos pese a la implementación fotovoltaica (FV), para esto es que la agricultura cumple un rol primario en algunos de estos sistemas y la generación

eléctrica cumple un rol secundario. La agricultura al tener un rol primario es priorizada y por ende, el sistema entero debe adaptarse al cultivo considerando las condiciones climáticas locales dentro del diseño del sistema agrivoltaico. En otros casos, se prioriza la implementación FV por sobre las consecuencias en la agricultura, lo cual, según experiencia internacional deriva en el abandono de las actividades agrícolas [25].

A Chile, se le conoce como un país de diferentes climas debido a su longitud Norte-Sur, desde climas áridos a climas lluviosos. Debido a la naturaleza de los sistemas AgriPV es que los climas más benéficos para este tipo de tecnología corresponden a climas alta radiación solar en conjunto con climas semi-áridos [25]. En Chile, este tipo de clima se presenta en la zona centro-norte del país, expandiéndose hacia el sur, lo cual es un buen indicio para el desarrollo del AgriPV.

Para un buen análisis con mirada a largo plazo, es necesario conocer las tendencias climáticas, así mismo como el desarrollo del calentamiento global y las sequías dentro del país. Es por esto que a continuación se describirán factores climáticos que inciden directamente en el desarrollo de la agricultura, así como sus tendencias a futuro.

1.2. Factores climáticos que inciden a la agricultura en Chile

A la hora de cultivar la tierra, tanto sea en un caso de agricultura convencional o agrivoltaico, existen factores que influyen directamente en el rendimiento de estos, tales como la temperatura, las precipitaciones y el cambio climático dentro de el medio donde el cultivo está emplazado. En esta sección se desprenderá como estos factores se han ido comportando a lo largo de los años en Chile, para así conocer sus tendencias para el futuro y posteriormente, tener una idea de si estas tendencias serían una ventaja o desventaja tanto para la agricultura tradicional como para el AgriPV.

1.2.1. Temperatura

La temperatura es un factor crucial para los cultivos, ya que estos requieren que se encuentre entre ciertos rangos para realizar procesos metabólicos óptimos, afectando su tasa de crecimiento y desarrollo. A nivel global, la temperatura ha ido cambiando

a lo largo de los años y así mismo sucede en Chile, 8 de los 10 años más cálidos en Chile desde 1961 se concentran en la últimas dos décadas [2]. Con esto en mente, se detallarán parámetros ya existentes de la temperatura, los cuales pueden ayudar a dar con una tendencia de esta hacia el futuro.

1.2.1.1. Temperatura media en Chile

Corresponde al promedio anual de la temperatura media en Chile continental. A continuación, en la Figura 1.4 se muestra la evolución de esta temperatura a lo largo del tiempo en Chile. Se puede observar en la Figura 1.4 que claramente existe una línea segmentada de tendencia positiva, la cual indica que la temperatura media en Chile debiese aumentar con el pasar de los años, con un alza de +0,15 [°C] por década. No obstante, cabe aclarar que esta tendencia no se sigue de manera uniforme, sino que en ciertos años, las mediciones de temperatura media se alejan de la línea de tendencia, por lo que se infiere que deben existir más fenómenos meteorológicos anuales que infieran en que la tendencia calculada no se siga de manera precisa.

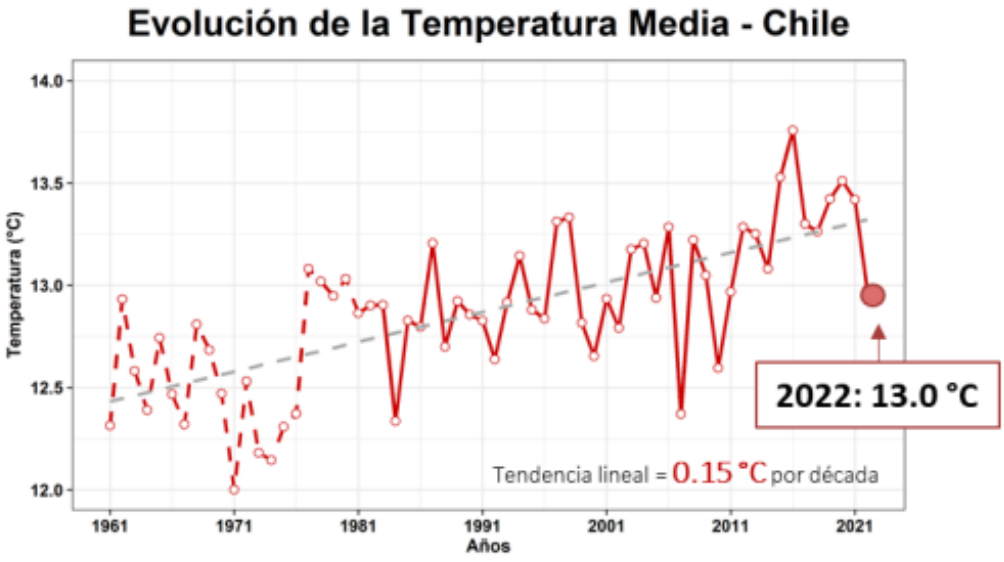


Figura 1.4: Promedio anual de la temperatura media en Chile continental utilizando 126 estaciones de medición a lo largo del país. La línea segmentada gris indica la tendencia lineal [2].

1.2.1.2. Tendencias de la temperatura media

En la Figura 1.5 se observan las tendencias de la temperatura media en Chile continental a nivel de estaciones meteorológicas. El 90 % de estas registra un aumento de temperatura, mientras que el 10 % restante muestra tendencias negativas o más frías, especialmente en la costa Norte-Centro de Chile.

Las localidades que poseen la mayor tasa de aumento de la temperatura son las ubicadas en la cordillera y valles a lo largo de Chile [2].

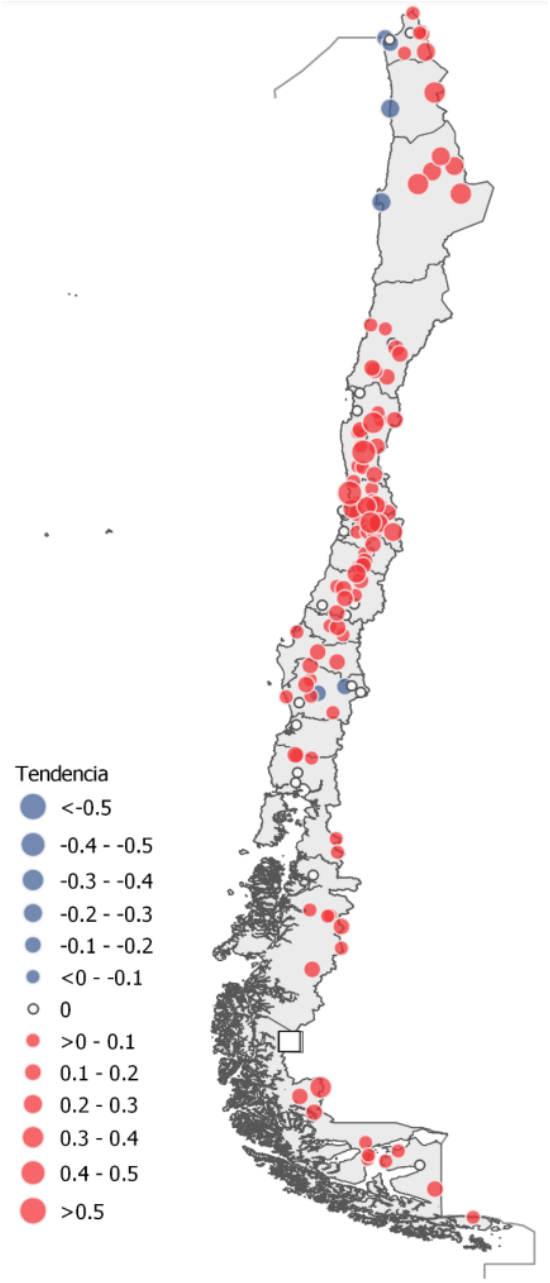


Figura 1.5: Tendencias en [°C] por década de la temperatura media. Círculos azules indican tendencias negativas (más frío) y círculos rojos indican tendencias positivas (más cálido) [2].

1.2.1.3. Simulaciones climáticas regionales: temperatura

El Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia ($(CR)^2$) realizó simulaciones climáticas regionales en Chile Continental con el objetivo de desarrollar proyecciones climáticas y así evaluar la vulnerabilidad del país a futuro. Estas simulaciones son realizadas con una resolución de 10 y 50 [km] para un periodo futuro comprendido entre 2016-2050. En este último se consideran dos escenarios de simulación para proyectar el futuro. El primer escenario de simulación, llamado RCP2.6, corresponde a un escenario donde el aumento de la temperatura media del planeta es inferior a 2 [°C] al 2100 (desde la era preindustrial). El segundo escenario corresponde al RCP8.5 donde se considera un calentamiento de hasta [5°C]. Además, se muestra un tercer escenario llamado MPI-ESM-MR, el cual corresponde a un modelo global del Instituto Max Planck de Meteorología [3]. Se presentan los resultados de las simulaciones en la Figura 1.6 para el caso de la temperatura.

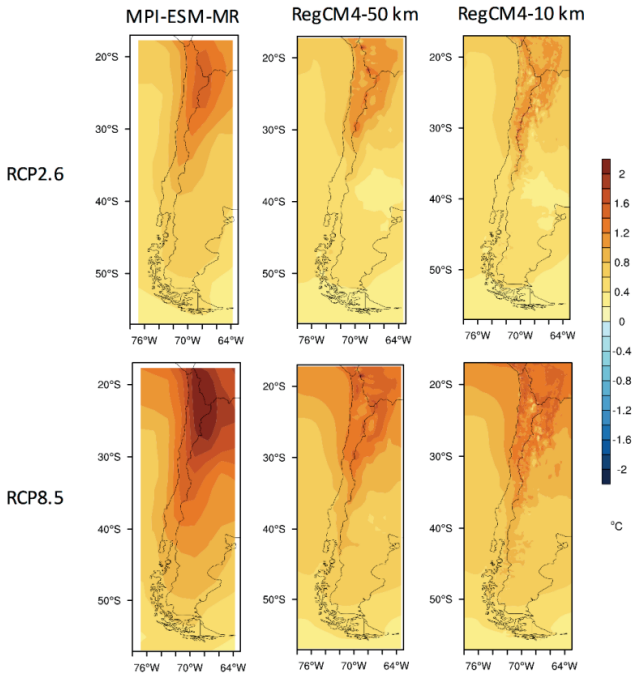


Figura 1.6: Mapas de cambio de temperatura ([°C], anual) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores) [3].

En la Figura 1.6, las simulaciones de 10 y 50 [km], en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, proyectan un aumento de temperatura anual en todo el territorio nacional, con un gradiente de mayor a menor de norte a sur y de cordillera a océano en Chile [3].

1.2.2. Precipitaciones

Las precipitaciones son fundamentales en lo que a agricultura respecta; es esencial en el proceso de fotosíntesis y el agua de lluvia se encarga de disolver nutrientes presentes en la tierra. En Chile, desde el año 2010, la zona central y centro-norte ha experimentado una situación crítica, donde dicho territorio ha sufrido un déficit de precipitaciones cercano al 30 %, fenómeno que persistió de forma ininterrumpida durante la última década [26]. A continuación, se presentarán datos acerca de las precipitaciones en Chile con el fin de dar a conocer las futuras tendencias de estas.

1.2.2.1. Precipitación anual

Corresponde al promedio anual de precipitaciones en Chile. Se puede observar en la Figura 1.7 que existe una línea segmentada que indica una tendencia negativa para la precipitación anual, esta indica que las precipitaciones en Chile debiesen disminuir en el tiempo, con una baja de -26 [mm] por década. Si se observa principalmente la última década, uno puede notar una disminución drástica en las precipitaciones, lo cual puede reflejar un panorama más devastador para Chile en cuando a merma de lluvias se trate.

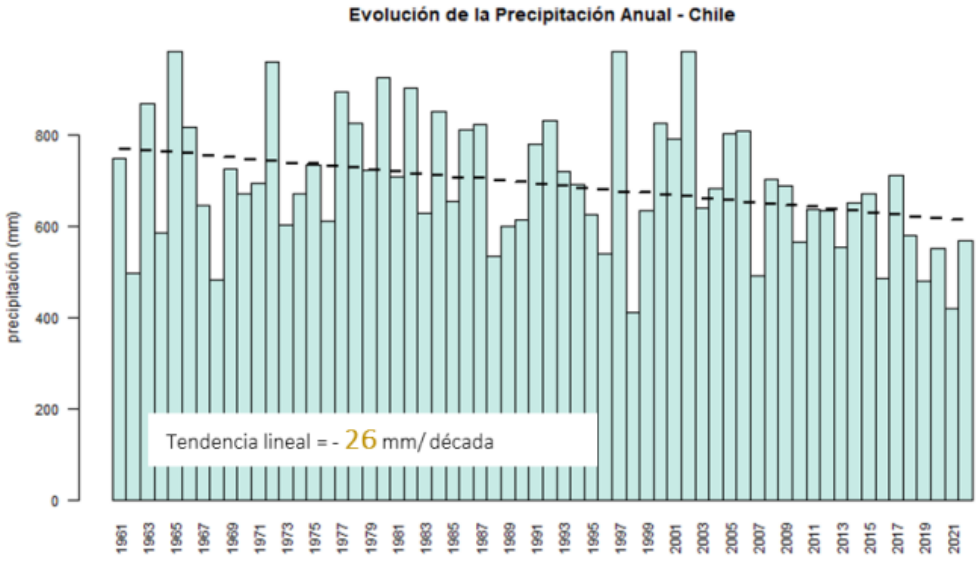


Figura 1.7: Precipitación total anual utilizando de 200 estaciones de medición a lo largo del país para Chile continental en milímetros y línea segmentada de tendencia lineal [2].

1.2.2.2. Tendencias de la precipitación

Observando la Figura 1.8, en el mapa de Chile continental anual, las tendencias observadas en los últimos años son negativas para la zona centro y sur del país, con entre un -14 a -6 [%/década], respectivamente.

A nivel estacional existen disminuciones de precipitación en la zona centro del país en las estaciones de otoño, invierno y primavera, mientras que en verano esta tendencia es positiva tanto en la zona altiplánica como en los valles de la zona centro-sur.

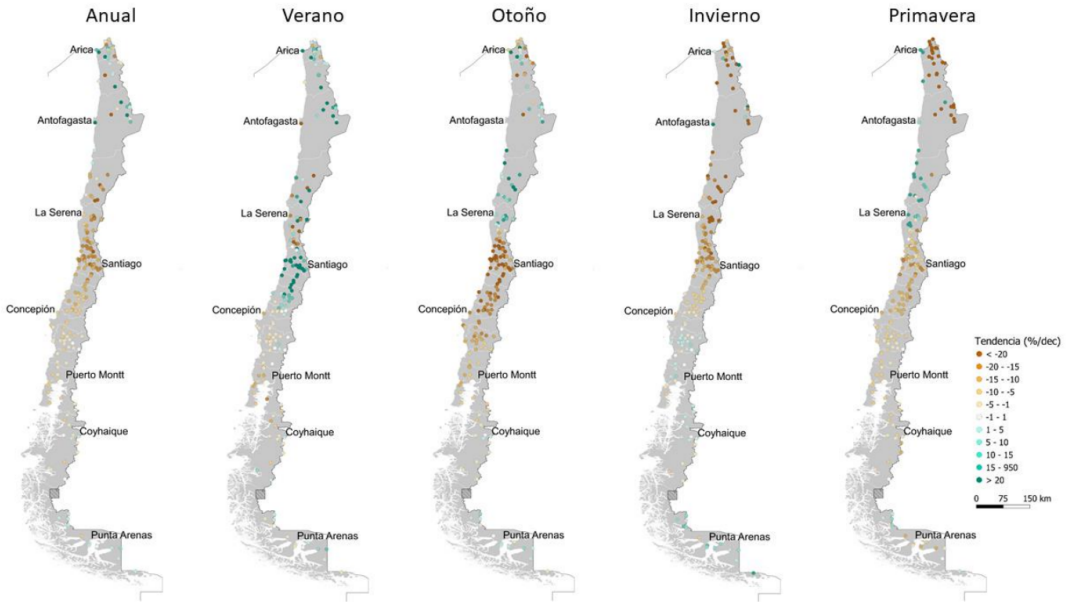


Figura 1.8: Mapas con las tendencias en [mm/década] de la precipitación a) anual y b) estacionales. Los círculos verdes y azules indican tendencias positivas es decir "tendencia ser más lluvioso", mientras que los cafés tendencias negativas "tendencia a ser más seco" [2].

1.2.2.3. Simulaciones climáticas regionales: precipitaciones

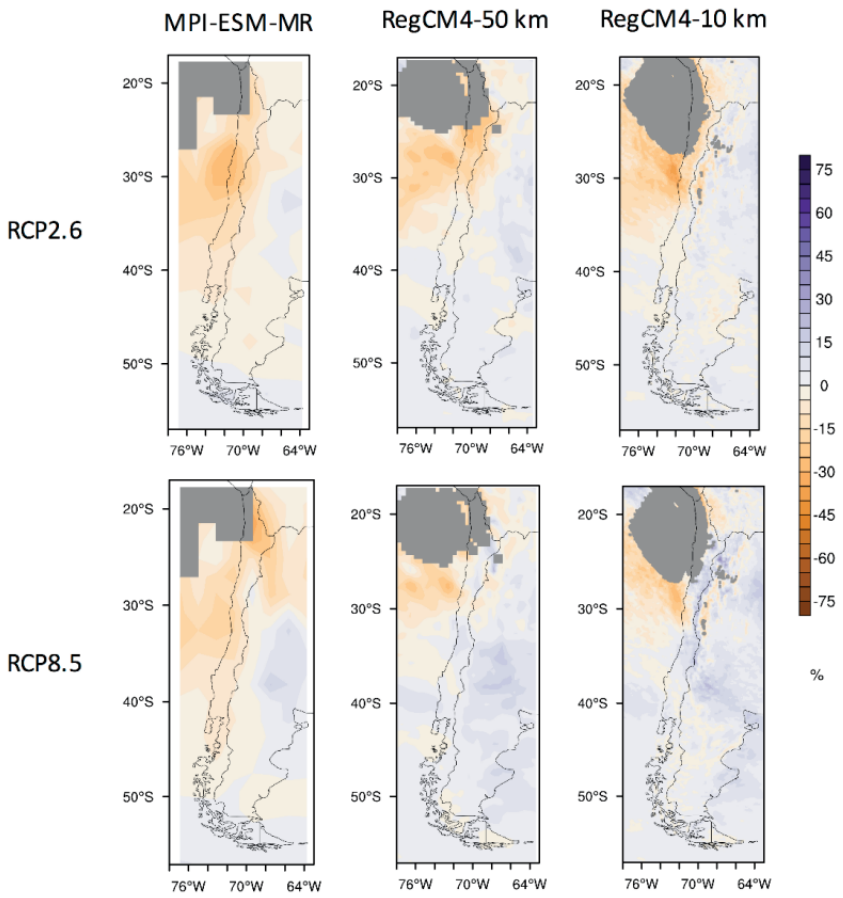


Figura 1.9: Mapas de cambio de precipitación (%, anual) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm. [3].

En la Figura 1.9 se muestran los mapas de cambio de precipitación anual. Las simulaciones correspondientes al modelo global MPI-ESM-MR proyectan una disminución de precipitaciones en la mayor parte del país (debido a la gama de colores cafés que indican déficit, a excepción de la Patagonia Sur que indicaría superávit debido a los colores azulados. Por otro lado, para los modelos de 10 y 50 [km], estos tienden a mostrar un mayor aumento de precipitaciones respecto al modelo MPI-ESM-MR, particularmente sobre la cordillera, en especial para la resolución de 10 [km] según el escenario RCP8.5, el cual correspondería un escenario con mayor resolución y peor pronóstico de forzamiento antrópico.

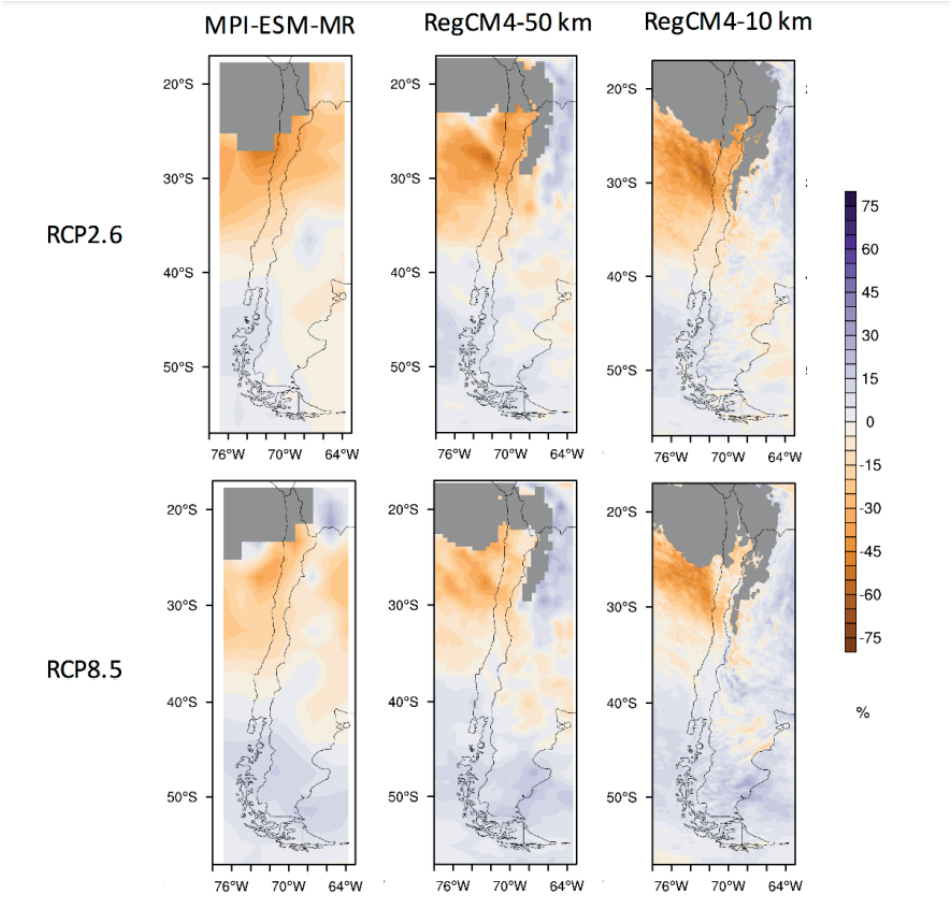


Figura 1.10: Mapas de cambio de precipitación (%, invierno) para el periodo comprendido entre 2021-2050 basado en el modelo MPI-ESM-MR según los escenarios RCP2.6 (paneles superiores) y RCP8.5 (paneles inferiores). El color gris corresponde a las áreas donde la precipitación promedio es menor que 5 mm. [3].

En la Figura 1.10 se muestran mapas de cambio de precipitación pero focalizado en invierno. Se puede observar una amplia disminución de la precipitación en dicha estación, sin embargo, las precipitaciones aumentan en otras estaciones, tales como otoño y primavera [3], lo que da como resultado una mayor tendencia a las precipitaciones en el promedio anual, lo cual está indicado en la Figura 1.9.

1.2.3. Radiación solar

Chile se destaca por tener uno de los niveles más altos de radiación solar en el mundo, aunque en general, la radiación solar dentro de todo el territorio chileno posee un alto potencial para la generación eléctrica mediante FV. En particular, Chile posee la radiación solar más alta del planeta, donde la irradiancia global horizontal (GHI) en la meseta de Chajnantor (extremo norte de Chile) es en promedio de 308 [W/m2], lo que equivale a una irradiación anual de 2,7 [MW/m2], la más alta a nivel mundial [27].

Por otro lado, la radiación solar está ligada al fenómeno de la nubosidad. Esto consiste en que las nubes reducen la cantidad de luz solar que llega a la superficie, lo que disminuye la irradiancia hasta en un 80 % (en el caso de nubes de gran espesor óptico) [28]. Además, existe un parámetro llamado Factor de Modificación de la Nubosidad (CMF), el cual corresponde a una medida adimensional que indica la atenuación de la irradiancia debido a las nubes. Un CMF de 0,7, por ejemplo, significa que las nubes reducen en un 30 % la irradiancia solar. Valores cercanos a 1 indican cielo despejado, mientras que valores más bajos señalan presencia significativa de nubes.

En Chile, existen herramientas para obtener información acerca de los niveles de radiación presentes en el país, lo cual es esencial para el desarrollo de proyectos FV, así como agrícolas. Una de las más recomendadas corresponde al explorador solar [29], la cual entrega información del GHI, el CMF y otros parámetros relacionados a la energía del sol para diferentes zonas del país, utilizando subestaciones que recopilan dicha información y quedando a disposición de la ciudadanía para el desarrollo de diferentes tipos de proyectos.

1.2.4. Crisis climática

La crisis climática presenta cada vez más desafíos para la agricultura: la escasez de agua, el clima extremo y el aumento general de las temperaturas requieren nuevas medidas para proteger los cultivos y suelos de las condiciones adversas. Esto limita significativamente el alcance para garantizar seguridad hídrica, sumado al consumo humano que ha superado la disponibilidad en ciertos caudales [30].

1.2.4.1. Sequía

Chile ha sido notoriamente afectado por la merma de precipitaciones de la última década, tanto es así que considerando como límite el año 2022, se completaron 16 años consecutivos con precipitaciones bajo el promedio [2].

A lo largo de su historia, la zona central de Chile ha experimentado sequías de uno o dos años de forma recurrente, las cuales han estado relacionadas con variaciones climáticas de origen natural. Sin embargo, existe un periodo más destacado, correspondiente desde la última década (2010-2020) hasta la actualidad (2022 con datos), conocido como la **"megasequía"**, el cual es el evento más prolongado y extenso que haya registrado en Chile con sequía pluviométrica [26].

Causas de la sequía

Las causas de este fenómeno pueden ser tanto de origen climatológico natural como de origen antrópico. Por parte de las causas de origen natural, gran parte de las variaciones de precipitación en Chile central, son moduladas por el El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Dichas alteraciones atmosféricas durante el o los años de **"La Niña", favorecen condiciones más secas que el promedio en Chile central.** Por el contrario, durante el periodo correspondiente a **El Niño, tienden a ocurrir condiciones más lluviosas en esta región** [26]. Los años que conforman la megasequía (2010 al 2022) se caracterizaron por poseer condiciones neutras o leves de ambos fenómenos, pero en particular con mayor presencia del fenómeno de La Niña. A continuación se presenta la Figura 1.11 que resume el comportamiento de estas alteraciones atmosféricas.

A pesar de todo lo anterior, el déficit de precipitación se mantuvo en la zona central del

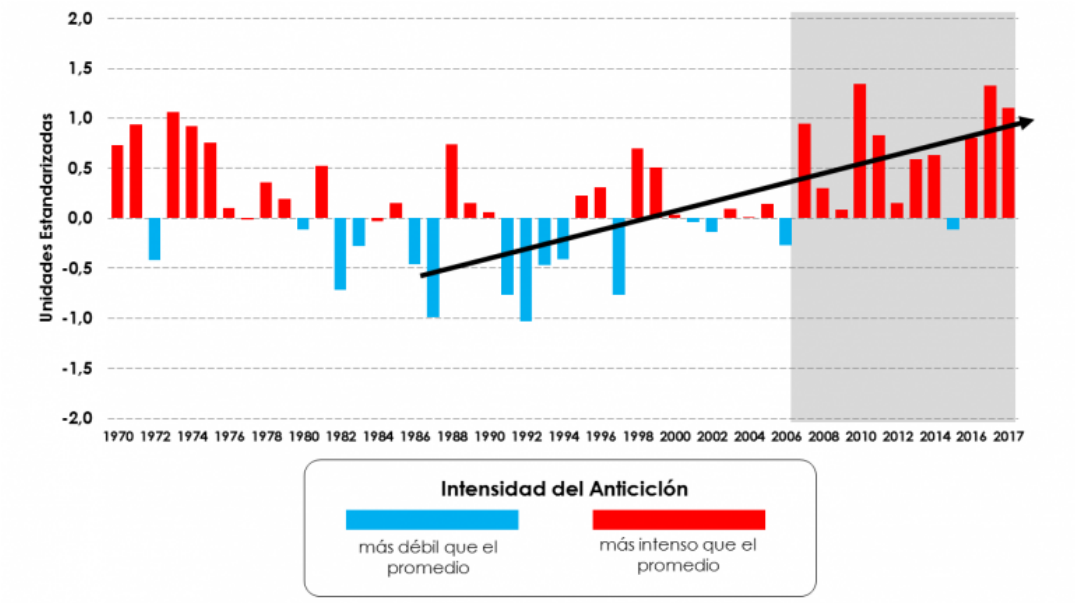


Figura 1.11: Promedio Anual del índice del Anticiclón del Pacífico Sur hasta el año 2017, las barras rojas indican presencia del fenómeno de La Niña, mientras que las barras azules la presencia del fenómeno de El Niño [4].

país durante la megasequía. Además, la probabilidad de que al azar ocurra una secuencia de 12 años secos como la observada en la Figura 1.7, es extremadamente baja. Esto sugiere la actuación de otros factores climáticos en la mantención e intensidad de la megasequía [26].

Por otro lado, al cambio climático antrópico se le atribuye cerca de un cuarto del déficit de precipitación dentro de la última década [26], esto es causado por el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), lo cual es un factor que permanecerá en el futuro, de manera que la ocurrencia de sequías como la actual irá en aumento, incrementando la aridificación de la zona centro/sur de Chile.

Simulaciones para el periodo 2010-2050, al utilizar un escenario pesimista de emisión de GEI, muestran la existencia de una megasequía cada 20 años [26], lo cual en la época preindustrial ocurría (mediante simulaciones) cada 300 años. Es importante tener en cuenta que a medida que pase el tiempo, las precipitaciones seguirán disminuyendo de manera permanente y sustancial [3], por lo que la definición de sequía podría pasar a ser un estado constante en el tiempo.

1.2.5. Impacto en agricultura

A modo de contexto; las plantas dependen de ciertos factores para poder desarrollarse. La cantidad de luz, el suministro de dióxido de carbono, la temperatura, el suministro de agua y la disponibilidad de minerales son los factores ambientales más importantes que afectan la tasa de fotosíntesis en las plantas terrestres [31].

La disponibilidad de algunos de estos depende principalmente del clima, lo que incluye: precipitaciones, radiación solar y temperatura local. Dado que los cultivos están anclados en tierra firme por sus raíces, **deben adaptarse a que el ritmo de sus procesos metabólicos esté determinado, en parte, por las condiciones climáticas locales**.

Tal como se detalló en secciones anteriores, la temperatura y precipitaciones han ido variando de manera perjudicial para la agricultura en Chile, lo que sumado a la presencia de una radiación alta en amplia parte del territorio chileno, nos entrega un contexto climático para los cultivos diferente al de décadas atrás, en especial con el aumento de las olas de calor [5] [3], la disminución de las precipitaciones [2] y eventos extremos como las heladas.

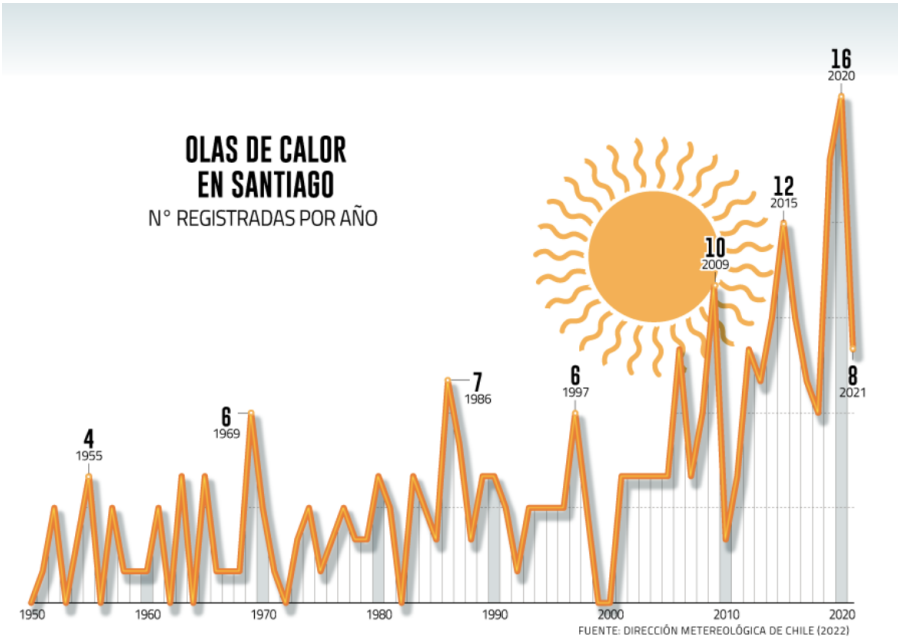


Figura 1.12: Número de olas de calor registradas por año en Santiago de Chile [5].

Durante las olas de calor y/o déficit de precipitaciones, se induce el cierre estomático en

las plantas. Este cierre es una respuesta para reducir la pérdida de agua por transpiración, lo que también limita la entrada de dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis, reduciendo así la eficiencia de esta [32]. Las plantas sometidas a estrés hídrico adaptan su metabolismo acumulando osmoprotectores y azúcares solubles para mantener la turgencia celular. Sin embargo, estos mecanismos no siempre son suficientes **para evitar el daño fisiológico y la disminución del rendimiento** [33].

Durante las heladas, las plantas sufren daños severos debido a la formación de hielo en los tejidos, interrumpiendo el transporte de nutrientes y causando deshidratación celular. Estos efectos son críticos durante el desarrollo reproductivo, resultando en la pérdida total de la cosecha y una reducción en la cantidad y calidad de los frutos y semillas [34].

En función de lo anterior, existen desafíos significativos para la agricultura en Chile. La variabilidad de la temperatura, la disminución de las precipitaciones y los eventos extremos, como las olas de calor y las heladas, afectan negativamente la fisiología de las plantas y, por ende, la producción agrícola y seguridad alimentaria. Es esencial implementar estrategias de adaptación y mitigación para asegurar la sostenibilidad y resiliencia del sector agrícola frente a estos retos climáticos, que, según lo expuesto en secciones anteriores, se van a seguir repitiendo durante los años y que tienen el potencial de transformar para mal a Chile, tal como lo hizo la megasequía entre el 2010 y el 2022.

1.3. Aspectos agrícolas en AgriPV

Las plantas, al igual que los otros seres vivos poseen necesidades que, en general, son cubiertas por la naturaleza misma. En el ítem anterior se puede visualizar el panorama climático chileno y así mismo, concluir que mucha flora ya no se podrá sustentar por si sola, así como los cultivos que cada vez necesitan de más irrigación y así mismo protección tanto para las heladas como para el calor extremo. El AgriPV llega como una posible solución a este problema debido a sus numerosas ventajas, como el aumentar la humedad del sistema y el otorgar sombra al cultivo, protegiéndolo de la escasez de agua, calor extremo y de heladas [25].

A pesar de lo anterior, para optar a la máxima producción en cultivos, se requiere de una captura completa de la radiación solar incidente que solo puede lograrse con niveles suficientes de agua y nutrientes [35]. Considerando esto, la agrivoltaica no puede aspirar a lograr una producción máxima en un escenario ideal, ya que la sombra generada en los cultivos por los módulos FV impide una captura completa de la radiación solar incidente. No obstante, los rendimientos pueden ser superiores dado que el AgriPV puede asegurar y contribuir a alcanzar los niveles necesarios de agua y protección para el cultivo [25], además de que no todos los cultivos tienen la misma necesidad lumínica teórica para sus usos metabólicos [6]. Con esto en mente, se debe tener en cuenta que lo rendimientos también pueden ser menores a pesar de aspirar a beneficios con el sistema AgriPV [25].

Para lograr un equilibrio óptimo entre la radiación incidente y los niveles necesarios de agua, es esencial un diseño meticuloso del sistema AgriPV [25]. Este diseño no solo debe satisfacer, sino idealmente mejorar los rendimientos del cultivo al mismo tiempo que genera energía eléctrica. Existen aspectos agrícolas de vital importancia, como el microclima que se crea por la sombra de los paneles, así como la selección cuidadosa de cultivos adecuados para la agrivoltaica, donde la disponibilidad y captación de luz son factores limitantes. Estos temas se explorarán a continuación en este apartado, además de investigaciones que validan el uso y el potencial del AgriPV.

1.3.1. Microclima

El concepto de microclima se refiere a las condiciones atmosféricas específicas que existen entre los paneles FV y los cultivos; dichas condiciones son fundamentales a la hora de diseñar un sistema AgriPV. La idea central es diseñar sistemas que puedan crear un microclima favorable, con tal de satisfacer las necesidades de un cultivo en específico.

Para lograr un microclima deseado, la disposición de los módulos PV es esencial, la cual debe variar según el microclima deseado para el cultivo. En este sentido, se debe tener en cuenta su orientación y disposición espacial, es decir, la distancia entre paneles y módulos FV, así como su altura y ángulo. En general, la intensidad de los cambios microclimáticos depende mayoritariamente de la altura de los soportes del sistema AgriPV, donde, mientras menor sea la altura, mayores serán los cambios microclimáticos, en conjunto con los otros factores [25].

Las consecuencias de instaurar un sistema AgriPV, es decir, un microclima para el cultivo, puede traer beneficios como la disminución del consumo de agua de riego, reducción de temperatura del suelo y posibles riesgos como la disminución de la radiación y rendimientos. En la siguiente sección se detallarán investigaciones que abarcan estos tópicos.

1.3.2. Investigaciones

Alrededor del mundo, existen distintos tipos de proyectos piloto, casos de estudio y proyectos comerciales que demuestran el uso del AgriPV, las posibles ventajas y desventajas que puede traer consigo; pudiendo existir un mejor aprovechamiento del terreno, ahorro de agua, protección para cultivos, aumento o disminución de rendimientos, entre otros. [25].

1.3.2.1. Alemania

En el caso de Alemania, se realizó en 2017 un proyecto de investigación llamado APV-RESOLA el cual consta de plantar cultivos tales como: apio, papas, trigo de invierno y trébol, tanto dentro como fuera de un sistema AgriPV.

Los resultados de la investigación variaron según el cultivo y el año. Las condiciones climáticas desempeñaron un papel significativo en el rendimiento de los cultivos. Por ejemplo, el rendimiento de las papas varió desde un 20 % menos en 2017 hasta un 11 % más en 2018 en condiciones secas y calurosas. El sistema AgriPV pudo reducir la evaporación y proteger contra la radiación solar intensa, lo que se considera importante debido al aumento de las olas de calor en Europa Central y Alemania. En 2017, los rendimientos del trébol fueron ligeramente inferiores, cercanos al 5 %, mientras que las papas, el trigo y el apio mostraron reducciones de rendimiento, siendo más pronunciadas en un 18-19 %. En 2018, un año seco, los cultivos de trigo, papas y apio aumentaron su rendimiento en comparación con la parcela de referencia. El apio fue el cultivo que más se benefició, con un aumento del 12 %. En 2019, hubo reducciones de rendimiento significativas, con una disminución del 19 % en el trébol, un 28 % en el trigo y un 33 % en el apio nabo [25].

Se presentan dichos resultados de manera simplificada, donde los números representan el cambio en el rendimiento en comparación con la parcela de referencia. Los signos (+) indican un aumento, los signos (-) indican una disminución y s/i indica que no hay información.

- **Papas:**
  - 2017: - 20 %
  - 2018: + 11 %
  - 2019: s/i
  - 2020: s/i
- **Trébol:**
  - 2017: - 5 %
  - 2018: - 8 %
  - 2019: - 19 %
  - 2020: s/i
- **Trigo de Invierno:**
  - 2017: - 18-19 %
  - 2018: + 3 %
  - 2019: - 28 %
  - 2020: + 2 %
- **Apio:**
  - 2017: - 18-19 %
  - 2018: + 12 %
  - 2019: - 33 %
  - 2020: s/i

En base a estos resultados, se puede apreciar el potencial de AgriPV como tecnología de adaptación ante el cambio climático, ya que en un año seco (2018), logró aumentar

el rendimiento de tres cultivos (papas, trigo de invierno y apio), a excepción del trigo, en agricultura seca.

1.3.2.2. Estados Unidos

Por parte de Oregón, Estados Unidos; en julio del 2019 se comenzó un caso de estudio mediante tomates trasplantados (Solanum lycopersicum var. Legend) con tres condiciones de luz: (1) directamente debajo de los paneles solares, (2) en filas entre paneles, (3) en un área de control lejos de los paneles [19]. Para todas las condiciones de luz usaron dos métodos de riego: completo y deficitario. Los resultados resumidos fueron los siguientes:

Tabla 1.1: Comparación de parámetros ambientales y de rendimiento de cultivos en diferentes condiciones: (1) directamente debajo de los paneles solares, (2) en filas entre paneles, (3) en un área de control lejos de los paneles [19].

1. Directamente Debajo de los Paneles Solares	**2. En Filas Entre Paneles**	**3. En un Área de Control Lejos de los Paneles**
Temperatura del aire: 19,8 °C Humedad relativa: 73,54 % Temperatura del suelo: 20 °C Velocidad del viento: No especificada Rendimiento de cultivos: 33,61 kg/fila, 21,64 kg/fila Productividad del agua en riego deficitario: 68,90 kg/m³	Temperatura del aire: 21,5 °C Humedad relativa: 79,38 % Temperatura del suelo: 24.7 °C Velocidad del viento: 0.65 m/s Rendimiento de cultivos: 53,59 kg/fila, 32,76 kg/fila Productividad del agua en riego deficitario: 93,11 kg/m³	Temperatura del aire: 22,3 °C Humedad relativa: 74,63 % Temperatura del suelo: 25.6 °C Velocidad del viento: 0.89 m/s Rendimiento de cultivos: 88,42 kg/fila, 68,13 kg/fila Productividad del agua: Menor en comparación

A partir de los resultados se pudo concluir que las zonas con escasez de agua son las que más pueden beneficiarse de los sistemas agrivoltaicos, ya que la gestión solar reduce la evapotranspiración de los cultivos sombreados y, en consecuencia, la demanda de agua [19]. Además, muchos tipos de cultivos pueden gestionarse con energía FV; sin embargo, es necesario realizar más análisis económicos con tal de evaluar los costes

y beneficios de la gestión solar activa y, así mismo, dar con una buena elección del cultivo, para que no existan disminuciones en los rendimientos.

1.3.2.3. Chile

En Chile central se realizaron tres proyectos piloto AgriPV de investigación, los cuales comparan la eficiencia hídrica, tanto en cultivos bajo el sistema AgriPV como en el campo abierto. Dentro de los resultados obtenidos por la investigación realizada entre noviembre de 2021 y enero de 2022 se tiene [36]:

- En verano del 2021 se midió una media del 29 % más de humedad del suelo bajo los paneles en comparación con la zona abierta.
- La irradiación horizontal global (GHI) es en promedio un 40 % más baja dentro del sistema AgriPV, en comparación sin este sistema.

De esto se desprende que gracias al sombreado del sistema AgriPV, se reduce la irradiación solar y la temperatura del suelo, lo que crea potencialmente un entorno más controlado para los cultivos y, por tanto, podría influir positivamente en la productividad de las tierras de cultivo, especialmente considerando que el AgriPV presenta mayores beneficios en climas semi-áridos [37] comparables a los de la zona centro-norte de Chile, donde el clima se vuelve cada vez más extremo con el pasar de los años.



Figura 1.13: Proyecto piloto AgriPV por parte de Fraunhofer Chile Research. Imagen: Franhofer Chile Research.

1.3.3. Cultivos adecuados

En el marco de la tecnología AgriPV, resulta esencial seleccionar aquellos cultivos que mejor se adecúen a las condiciones de sombreado del sistema. Para esto, el diseño del sistema agrivoltaico adquiere una relevancia fundamental para gestionar la cantidad de luz que llega al cultivo y, con ello, prever con mayor precisión los rendimientos esperados.

1.3.3.1. Captación de la luz

Una necesidad fundamental para las plantas es el realizar fotosíntesis y evapotranspirar para generar energía y subsistir, donde es fundamental la captación de radiación solar, agua y nutrientes. En las prácticas agrícolas comunes, la estrategia se centra en maximizar el área foliar del cultivo que intercepta la radiación solar con tal de lograr una mayor cobertura de la parte superior de la planta [38]. De esta manera se logra que exista una mayor cantidad de área foliar que intercepte una mayor cantidad de luz, para así crecer

lo máximo en el menor tiempo posible.

A pesar de lo anterior, la variedad actual existente de cultivos, tanto sea por ser de diferentes tipos o por la alteración genética, posee distintos requerimientos lumínicos [39]. Esto abre una posibilidad para gestionar y aprovechar el recurso de la luz de manera más eficiente como ya se ha hecho en distintas partes del mundo, donde se aprovecha la modificación genética, por ejemplo, para plantas semillas modificadas que requieran una menor cantidad del recurso luz en lugares donde precisamente no existen días largos [40]. Es así, que tanto la variedad de cultivos, la modificación genética y la variedad de especies dentro del mismo cultivo, entrega una amplia posibilidad para el desarrollo del AgriPV y así poder gestionar la luz que se le entrega al cultivo [41].

A continuación, se mencionará el punto de saturación de luz que permite conocer un límite teórico de cuanta luz necesita cada especie de cultivo.

Punto de saturación de luz

El punto de saturación lumínica es la intensidad de luz en la cual aumentos adicionales de esta, ya no incrementan la fotosíntesis, este punto depende de la cantidad de CO_2 y temperatura del ambiente, además de otros factores como la especie de planta, su genética, sus condiciones de crecimiento y su adaptación al entorno. Después de este punto, los cultivos no pueden convertir más luz en producción fotosintética e incluso pueden resultar dañados. Cuanto más bajo sea el punto saturación lumínica de un cultivo, más adecuado es ese cultivo para un sistema agrivoltaico [37].

1.3.3.2. Índice de cobertura del suelo

Otra manera de preveer rendimientos de los cultivos en una instalación AgriPV consiste en utilizar el Índice de Cobertura del Terreno (GCR por sus siglas en inglés) como indicador del rendimiento potencial de los cultivos en los sistemas AgriPV. El GCR corresponde a relación entre la superficie de los paneles FV y la superficie del terreno, pudiendo calcularse y controlarse fácilmente para todo tipo de sistemas AgriPV con paneles fijos o móviles [42].

Esto nace a partir de una investigación que reúne datos publicados sobre la productividad de los cultivos bajo sistemas AgriPV, incluyendo las publicaciones que proporcionasen

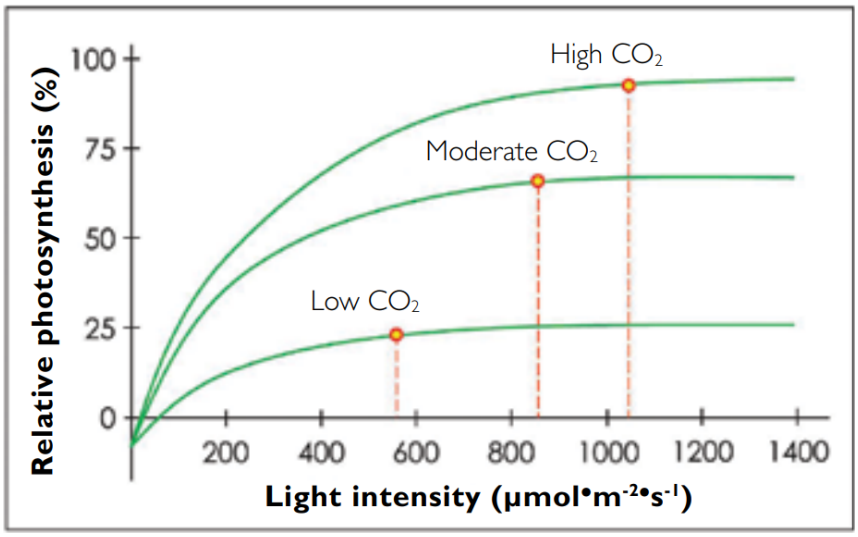


Figura 1.14: Ilustración de cómo las plantas pueden aprovechar más luz para la fotosíntesis cuando aumenta la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Los puntos indican los puntos de saturación de luz, y por encima de estos valores, luz adicional no aumenta la fotosíntesis [6].

tanto el GCR del sistema como los rendimientos de los cultivos. En este caso, a pesar de la dispersión de los resultados, se evidencia un patrón claro: Los rendimientos disminuyen rápidamente cuando aumenta el GCR, lo que supone que se requiere un GCR <25 % para garantizar que la mayoría de los rendimientos de los cultivos se mantengan >80 %.

1.3.3.3. Valor agregado

Otro parámetro bajo el cual se puede diferir entre si un cultivo es apto para una aplicación con AgriPV, es la viabilidad económica de la construcción del sistema AgriPV, la cual viene a estar dada por el valor agregado que posea el cultivo. En otras palabras, dependerá de la posibilidad que tenga el agricultor/empresa de que el cultivo sea lo suficientemente rentable y así poder invertir en un sistema AgriPV que asegure una mejor resiliencia climática debido a las características mencionadas anteriormente. Dentro de los sectores con mayores posibilidades se encuentran el sector de alimentos para exportación, particularmente el sector de la fruticultura que posee cultivos permanentes y con tiempos de vida útil similares a los sistemas FV.

1.4. Sistemas AgriPV y sus tecnologías

Anteriormente, se ha explicado que los sistemas AgriPV varían dependiendo del cultivo para el cual están diseñados. A pesar de aquello, existen tecnologías generales para el funcionamiento de la planta FV del sistema AgriPV, así como existen tecnologías específicas y diseños particulares que nacen de la aplicación y la diversidad de los cultivos. A continuación, se presentarán dichas tecnologías enfocadas en los suministros de una planta FV y la tecnología en lo que respecta a la construcción agrivoltaica como aplicación innovadora.

1.4.1. Tecnología de módulos FV

De manera preliminar, todos los módulos FV son válidos dentro del ámbito del AgriPV. Sin embargo existen parámetros como la eficiencia, la disponibilidad y el precio en el mercado, que influyen en la elección de un tipo u otro de módulo FV, además de los requerimientos agrícolas. A continuación se explayarán los tipos de módulos FV existentes en la actualidad y su relación con la agrivoltaica.

Módulos de silicio cristalino (c-Si)

Corresponde a la mayor parte del mercado, ya que cubre este con una participación del 95 % alrededor del mundo [43]. Las celdas están disponibles en variantes multi-cristalinas (multi-Si) y monocristalinas (mono-Si), siendo esta última la que en 2019 abarcó un 70 % de los módulos c-Si fabricados. Actualmente la eficiencia promedio de los módulos de los 10 mejores manufactureros de esta área ronda alrededor del 18 %, la cual a mejorado comparado con el 12 % de hace 10 años. Dependiendo de calidad, pueden alcanzar eficiencias de hasta 23,2 % [43].

Existen tres subtipos ampliamente usados dentro del AgriPV, estos corresponden a los paneles monofaciales, bifaciales y semi-transparentes los cuales se muestran en la Figura 1.15.

Los módulos monofaciales son del tipo estándar, es decir, la radiación solar utilizable proviene solo desde la cara frontal del panel. **Los módulos bifaciales** poseen la diferencia de que pueden captar radiación solar tanto por la cara frontal como la cara posterior,

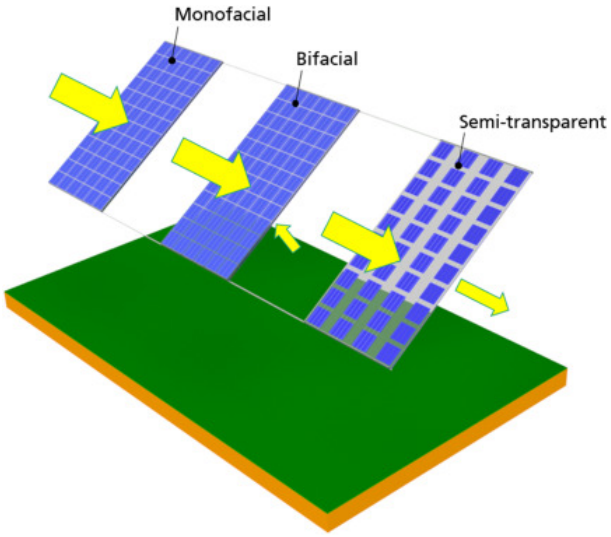


Figura 1.15: Ilustración de los tres módulos principales c-Si utilizados en AgriPV [7].

lo que permite un rendimiento adicional que depende de el factor de bifacialidad (BF) y el albedo del suelo. El BF corresponde a la relación entre la eficiencia de la cara posterior y la cara frontal en condiciones de prueba estándar. Por otro lado, el albedo del suelo refiere al porcentaje de radiación solar reflejada por el suelo. Los valores de albedo según la literatura dan, por ejemplo, (0,17) para suelo desnudo y (0,25) para hierba [44]. Sin embargo, existen estudios que midieron los valores de albedo durante el proceso de crecimiento de los cultivos, en estos se identificó un fuerte aumento del albedo con un mayor índice de área foliar de los cultivos (de 0,15 a 0,24) [45].

Por otro lado, **Los módulos semi-transparentes** están diseñados para transmitir una parte de la luz solar a los cultivos situados debajo. Permiten una transmisión ajustable de luz, optimizando la fotosíntesis y mejorando el rendimiento de los cultivos al controlar la cantidad y el espectro de luz que llega a las plantas [46]. Además, pueden actuar como barrera protectora contra condiciones climáticas adversas como granizo, lluvias intensas y radiación solar excesiva, reduciendo el estrés en las plantas y protegiendo el rendimiento agrícola [47].

Sin embargo, presentan desventajas técnicas. La eficiencia energética de los módulos semi-transparentes es menor en comparación con los módulos FV opacos convencionales, ya que parte de la luz solar se transmite en lugar de convertirse en electricidad, lo que reduce la generación de energía por unidad de área. Además, los costos de fabricación son más altos debido al uso de materiales especializados y procesos de producción más

complejos, lo que puede afectar la viabilidad económica del sistema AgriPV [48].

En los Países Bajos (Figura 1.16) se construyó un sistema especializado para la producción de bayas utilizando módulos semi-transparentes. La idea de este sistema es utilizar dichos módulos cerca de los cultivos para protegerlos de efectos adversos del clima tales como granizo o lluvias intensas [25]. Al ser semi-transparentes no afecta de sobremanera la cercanía de los módulos al cultivo.



Figura 1.16: Sistema AgriPV con paneles semi-transparentes elevados para producción de bayas © BayWa r.e. [8].

Módulos de película delgada

En la actualidad, los módulos comerciales de película delgada se basan normalmente en celdas de silicio amorfo (a-Si), cobre-indio-galio-diselenuro (CIGS) y el telururo de cadmio (CdTe) [7]. Poseen un precio levemente mayor a su contraparte (c-Si) [49] y ofrecen una gran flexibilidad de diseño en cuanto al tamaño, la forma, la flexibilidad mecánica y la apariencia del módulo [50]. Su penetración en el mercado global es baja, con una participación del 5 % [43], esto debido a su menor eficiencia en comparación con los módulos c-Si.

1.4.2. Tecnología de la subestructura

La subestructura de un sistema PV corresponde a la estructura de montaje y junto a la fundación de esta que sostiene a los módulos PV. Existen distintos tipos de tecnologías de subestructura que son las más usadas en la industria PV.

Subestructuras fijas

Las subestructuras fijas son las más empleadas en proyectos solares debido a su simplicidad y bajo costo de mantenimiento. Están diseñadas para sostener los paneles en una posición fija, generalmente inclinada, con un ángulo óptimo para maximizar la captación de radiación solar durante el año. En proyectos de energía FV, se suelen instalar en terrenos planos o con poca inclinación y se orientan de manera óptima según la latitud del lugar, buscando una exposición continua al sol a lo largo del día.

En los sistemas AgriPV, las subestructuras fijas pueden poseer desde diseños que varían en altura con los módulos PV por sobre los cultivos hasta diseños específicos como el de la Figura 1.16, el cual posee una estructura fija con tal de proteger al cultivo de climas adversos. Este tipo de diseño suele ser más adecuado para cultivos que se benefician de una sombra constante [25].

Seguidores solares

Los seguidores solares (trackers) son estructuras mecánicas móviles que permiten a los paneles solares rastrear el movimiento del sol durante el día. Existen dos tipos principales: los rastreadores de un solo eje, que giran los paneles de este a oeste a lo largo del día, y los de dos ejes, que ajustan tanto el ángulo horizontal como el vertical, asegurando una alineación óptima con el sol en todo momento. Estas subestructuras permiten una mayor eficiencia energética, ya que los paneles están en la mejor posición para captar la radiación solar en cada instante. En la Figura 1.17 se presenta una ilustración representativa de los distintos sistemas de seguimiento solar.

Para la tecnología AgriPV, los rastreadores pueden solares ofrecen la ventaja de poder ajustar la sombra proporcionada a los cultivos según las necesidades del momento, lo cual es posible pero es un reto no menor. En horas más soleadas, los rastreadores pueden

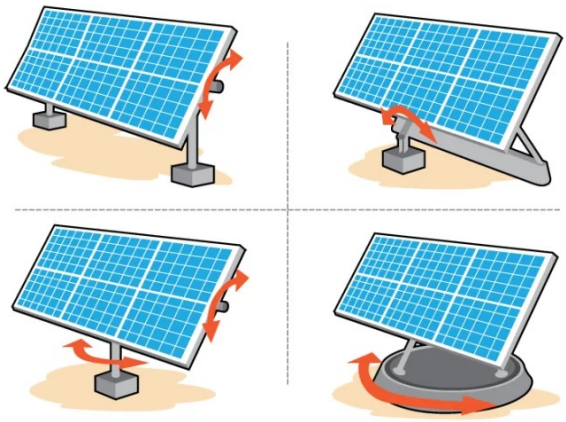


Figura 1.17: Tecnologías de seguimiento solar presente en las subestructuras de sistemas PV [9].

posicionar los paneles para que proporcionen más sombra, protegiendo los cultivos del estrés hídrico o térmico. Además, durante la mañana o la tarde, los paneles pueden moverse para dejar pasar más luz solar, lo que puede beneficiar el crecimiento de ciertos cultivos (Todo esto a manera de ejemplo).

1.4.3. Fundación de la subestructura

Para cumplir con una fundación adecuada para el AgriPV es importante tener en cuenta la reversibilidad de la construcción, de esta manera el terreno puede potencialmente volver a operar como terreno netamente agrícola. Los puntos claves a tener para cumplir este objetivo son:

1. No hacer uso de hormigón en tierras AgriPV.
2. Garantizar la reconstrucción completa sin impacto negativo en el suelo.

Dentro de los tipos de fundaciones que se pueden usar se encuentran:

Pilotes helicoidales: Estos son elementos de fundación profunda compuestos por un eje de acero al que se le han soldado una o más hélices. Proporcionan una base sólida para las estructuras FV, se instalan atornillándolos en el suelo mediante equipos especializados hasta alcanzar la profundidad y capacidad de carga deseadas. Estos pilotes son adecuados para soportar cargas pesadas y son ideales para terrenos agrícolas porque no alteran la estructura del suelo, permitiendo la reversibilidad

al finalizar el proyecto, lo que garantiza la restauración del terreno [18]. En la Figura 1.18 se presenta un ejemplo de este tipo de fundación indicado con el número 1.

Tornillos de tierra: Son elementos de fundación más pequeños que los pilotes helicoidales aunque también poseen una forma helicoidal. Están diseñados para cargas más ligeras con una instalación más sencilla y rápida, a menudo sin necesidad de maquinaria pesada, lo que los hace ideales para proyectos donde se requiere más económica con mínimas perturbaciones al terreno. Este tipo de fundación es la más ideal para proyectos donde la reversibilidad y el bajo impacto en el suelo son esenciales [18]. En la Figura 1.18 se presenta un ejemplo de este tipo de fundación indicado con el número 2.

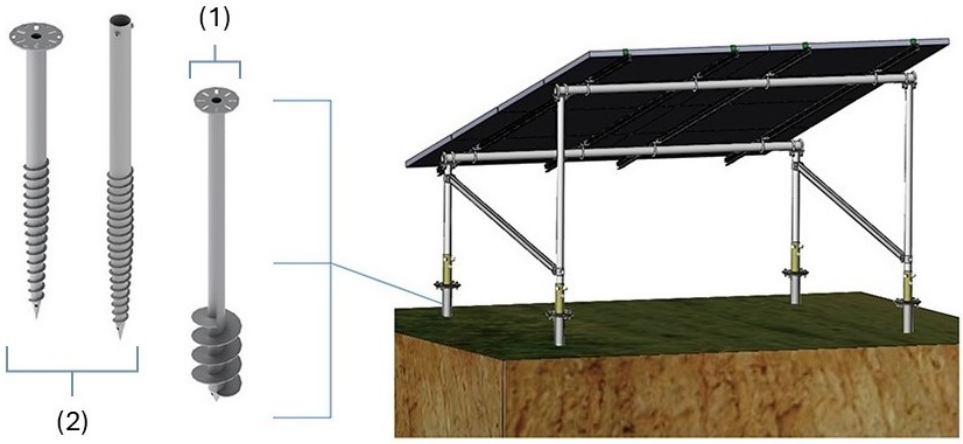


Figura 1.18: Tipos de fundaciones reversibles para la subestructura de un sistema AgriPV.

1.4.4. Maquinaria agrícola

En el caso de la tecnología AgriPV es importante destinar un espacio para el trabajo agrícola, ya sea este realizado por personas a pie o por maquinaria agrícola. En el caso de la maquinaria agrícola es esencial conciliar la viabilidad del uso de la maquinaria así como los efectos deseados por el sombreamiento de los paneles PV. Para lograr esto, existen factores claves a considerar para asegurar dicha combinación.

Altura y espaciado de los paneles: Los paneles FV deben estar lo suficientemente elevados para permitir el paso de maquinaria agrícola estándar, como tractores o

cosechadoras. Por ejemplo, en algunos proyectos, las estructuras de los paneles se elevan a más de 4 metros, lo que facilita las operaciones sin obstáculos y minimiza el daño a las cosechas o a los equipos [18]. Además, el espaciamiento entre los paneles es crucial para permitir la circulación de vehículos.

Accesibilidad y maniobrabilidad: Es fundamental diseñar las áreas debajo de los paneles con accesos adecuados y rutas claras para maquinaria, evitando áreas donde el suelo se pueda compactar demasiado o acumular agua. En proyectos AgriPV previos, se ha observado que la acumulación de agua bajo los paneles puede dificultar el uso de maquinaria, lo que sugiere la necesidad de un drenaje eficiente [18].

1.5. Síntesis

A continuación, se sintetizará la información sobre AgriPV detallada anteriormente desde un enfoque en función del clima chileno y sus tendencias. De esta manera, la idea es entender de qué manera la agrivoltaica posee un potencial para la adaptabilidad de la agricultura frente al cambio climático.

1.5.1. Potencial del AgriPV en Chile

Como se ha mencionado anteriormente, el AgriPV hace uso dual del suelo, aprovechando el emplazamiento de paneles solares sobre suelo agrícola, con el objetivo de otorgar beneficios y sinergias a la agricultura. Dentro de Chile existe una gran variabilidad climática, lo que implica que el uso de esta tecnología no es apto para todo el territorio chileno, es más, se sabe que el AgriPV posee potencial en zonas semi-áridas [37], lo que coincide con la zona centro-norte, central y centro-sur de Chile. A partir de esto, se pueden otorgar beneficios tales como: **medidas contra la desertificación, protección de cultivos (frente a radiación solar, olas de calor, granizos, precipitaciones, etc) y/o sinergias entre cultivos (mejora de microclima, reducción de tasa de riego, entre otros) [18]**.

Con estos beneficios en mente, los pasos a seguir para implementar esta tecnología deben contemplar un rol coherente con las necesidades del cultivo a lo largo de su desarrollo.

Para esto es fundamental que se cumplan sinergias o exista algún beneficio para el cultivo, con tal de que se justifique el uso del AgriPV como medida de adaptación para el cambio climático, ya que sus beneficios van de la mano con promover la resiliencia climática de la explotación agrícola. En resumen, si se quiere implementar el AgriPV, se necesita ser coherente con el entorno y entregar sinergias a los cultivos.

A continuación, se detallarán sinergias claves del AgriPV y como se disponen sus tecnologías para así cumplir dichas sinergias.

1.5.1.1. Gestión de sombra

A través de una correcta gestión de la sombra generada por los paneles solares se puede lograr:

Reducción de la tasa de riego

A partir de la sombra generada por los paneles solares, puede existir una mayor conservación de la humedad en la tierra y reducción de la evapotranspiración del cultivo [18]. Además, en Chile este efecto se ha corroborado en la Región Metropolitana (RM), donde en base a proyectos piloto se logró observar un 29 % más de humedad bajo el sistema AgriPV en comparación con la zona abierta , así como una disminución aproximada de 3 [°C] en la temperatura del suelo [36].

En este caso, la tecnología que promueve la reducción de la tasa de riego vienen a ser principalmente los módulos FV, donde la sombra producida por estos, puede disminuir el uso de agua de riego [24]. La idea es que exista un sombreado parcial, con tal de disminuir la radiación directa y así mismo, la temperatura del suelo.

Por otro lado, se recomienda aplicar sistemas de riego tecnificados que puedan alimentarse con la misma energía eléctrica generada por los módulos FV.

Control de microclima

A partir de la existencia de los módulos FV, se puede crear un clima específico entre los paneles y el cultivo [25], al cual se le conoce como microclima. La idea central es

gestionar dicho microclima para favorecer al cultivo, pudiendo crear generar un entorno más controlado entre los paneles y el cultivo [36].

Con respecto a las tecnologías que promueven este fenómeno, la instalación de módulos FV con sistemas de seguimiento (trackers) y el uso de paneles semi-transparentes son dos estrategias que pueden mejorar el microclima en un sistema AgriPV. Los paneles FV semi-transparentes pueden transmitir una parte de la luz solar a los cultivos situados debajo, lo que puede mejorar el rendimiento de los cultivos al controlar la cantidad y el espectro de luz que llega a las plantas [46].

A su vez, los seguidores solares pueden ajustar la orientación de los paneles según la posición del sol, regulando la sombra y la cantidad de luz, lo que reduce el estrés térmico y lumínico en las plantas [25]. Además, su flexibilidad promueve una mejor ventilación, previniendo condiciones favorables al desarrollo de enfermedades [25].

1.5.1.2. Protección de cultivos

La tecnología FV se puede usar para la protección de cultivos frente a fenómenos climáticos adversos.

Radiación solar

Al existir módulos FV que den sombra en la explotación agrícola, se puede usar como barrera protectora contra la radiación solar excesiva en el cultivo [47], potencialmente permitiendo el reemplazo de mallas de sombra que se usan actualmente en la agricultura. A partir de los resultados obtenidos de proyectos piloto en la Región Metropolitana de Chile, se ha logrado observar una reducción de la irradiación incidente en 40 % [36], mediante el uso de paneles bifaciales.

La tecnología AgriPV que contribuiría a disminuir la radiación solar corresponde al uso de paneles FV, esto con el objetivo de otorgar sombra directa o filtrar parte de radiación solar. Además, la existencia de seguidores solares (trackers) puede otorgar mayor o menor sombra según la necesidad, disminuyendo la exposición excesiva al sol.

Olas de calor

En Chile, ha existido un aumento sostenido de las olas de calor durante los últimos años [5], lo que induce el estrés hídrico en plantas pudiendo provocar daño fisiológico y **disminución del rendimiento** [33]. El AgriPV es una tecnología que puede ayudar a mitigar los efectos del calor gracias al uso de soportes elevados, pudiendo mantener el flujo aire o un diseño abierto [25].

A su vez, como la idea es proteger los cultivos tanto de la radiación directa como del calor extremo, la existencia de paneles FV también contribuye mitigando la radiación solar y así reduciendo el estrés en las plantas [47].

Granizo y precipitaciones

En Europa se ha hecho uso del AgriPV para proteger del granizo, donde se usan los módulos FV para reemplazar las mallas de granizo [48], haciendo de techo protector. Además, esta misma disposición puede disminuir los efectos adversos de las precipitaciones, como por ejemplo, los daños físicos que se pueden provocar a las flores cuando llueve [25].

Para habilitar dicha protección se suelen usar paneles semi-transparentes cercanos al cultivo, logrando hacer de barrera protectora ante el granizo [47] al mismo tiempo que se permea la luz para el cultivo [46].

Capítulo 2

Revisión de políticas internacionales y recomendaciones para la implementación de la agrivoltaica en Chile

En el capítulo anterior se abordó la noción de la agrivoltaica y la tecnología asociada a ella así como se analizó el contexto climático de Chile, pudiendo relacionar ambos aspectos. De esta manera se pudo concluir que el AgriPV puede ser un aporte para la mitigación y adaptabilidad al cambio climático, lo que es fundamental para un país de alto riesgo frente a esta condición. Así en este capítulo, primero se investigarán los contextos del rubro de la agricultura y de la energía, todo desde un punto de vista del AgriPV (Desafíos intersectoriales), con tal de identificar barreras que existan para la implementación de esta tecnología. Luego, se investigará acerca de los países que ya hayan implementado el AgriPV, para entender qué las regulaciones aplicaron y con cuales motivos, con el fin de entender que recomendaciones se pueden implementar en Chile y así garantizar un ecosistema habilitante y atractivo para la implementación de la agrivoltaica.

2.1. Metodología

Para la realización de este capítulo se contó con la ayuda de tres expertos en el área del AgriPV, donde en conjunto se pudo identificar tanto los desafíos intersectoriales, los desafíos para implementar la tecnología y, a partir de recabar información acerca de políticas internacionales en materias de AgriPV, se pudo desprender recomendaciones para la posible implementación del AgriPV en Chile. El trabajo se documentaba en un escrito y se realizaban reuniones, las cuales fueron:

- Reuniones online periódicas entre cada dos semanas y un mes. Con estas reuniones se repartían los tópicos para investigar y avanzar por cada uno dentro de este periodo, entre otras cosas.
- Reuniones presenciales eventuales para avanzar y corregir el escrito en desarrollo. Con estas reuniones se trabajaba entre cuatro a cinco horas discutiendo el contenido, el orden y la redacción de este, la estructura del documento, entre otros tópicos.

Los manera en que se abordó el desarrollo del documento fue:

1. Se propone la estructura del documento:
    - AgriPV: concepto de uso dual de la tierra (Introducción).
    - Desafíos para la producción agrícola y generación de energía en un contexto de cambio climático (Incluyendo desafíos intersectoriales y para la implementación del AgriPV).
    - AgriPV: oportunidad para la adaptación del sector agrícola en el proceso de transición energética justa (Donde se mencionan los beneficios para cada rubro implicado).
    - Recomendaciones para la regulación del AgriPV en Chile.
2. Investigación acerca los desafíos de los rubros asociados al AgriPV en Chile, a partir de esto se desprenden los desafíos intersectoriales presentes en Chile que motivan la integración del AgriPV como solución.
3. Investigación acerca de los beneficios del AgriPV, con el objetivo de entender como esta tecnología puede contribuir a apalear dichos desafíos. Para la inves-

tigación se apoya en el capítulo anterior, el cual corresponde al estado del arte sobre la tecnología AgriPV.

4. Investigación respecto de los desafíos que existen para la implementación del AgriPV en Chile.
5. Conforme a lo anterior, realizar recomendaciones políticas para la implementación del AgriPV en Chile.

2.2. Desafíos intersectoriales y AgriPV

2.2.1. Desafíos agrícolas

Chile es uno de los países más vulnerables frente al cambio climático y fue categorizado como el primer país de América Latina con alto estrés hídrico [51]. Entre los años 2017 y 2022 se ha presentado un déficit de precipitaciones superior al 20 %, empeorando las consecuencias de la megasequía [26]. El 2022 fue el decimotercer año consecutivo por debajo del promedio histórico de precipitaciones y como resultado, gran parte de las regiones del centro de Chile están en crisis hídrica.

Este periodo se superpone y acentúa una tendencia hacia un clima más seco observado desde la región de Coquimbo hasta la región de Aysén [30]. En un caso pesimista y según proyecciones climáticas, el déficit de precipitaciones de la zona central puede llegar a superar el 30 %, es decir, una condición similar a la megasequía, pero en régimen permanente. Este régimen representa una condición promedio y anticipa la ocurrencia de años aún más secos debido a la variabilidad natural del clima en la zona [30]. Todo esto se traduce en una menor disponibilidad del recurso hídrico para el futuro.

Ahora bien, las actividades agrícolas y ganaderas representan un 75 % de las extracciones consuntivas de agua en Chile, con un uso máximo en el verano [30]. Por otro lado, la demanda de agua en la zona centro-norte del país ha ido en aumento, mientras que la disponibilidad hídrica muestra una tendencia negativa en el tiempo [30], esto supone un escenario insostenible a largo plazo.

A nivel de eficiencia del recurso hídrico, en 2021 la productividad económica del agua de la agricultura chilena fue de 0,52 USD por m^3, comparada con una media de 1,01

USD por m³ en América Latina en 2019 [52], lo que subraya la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua en el país. Además de la escasez de agua, eventos climáticos como granizo, lluvias torrenciales y olas de calor afectan la producción de alimentos, heladas, mermando rendimientos o incluso, provocando pérdidas totales de los cultivos.

La combinación de estos factores climáticos y económicos demuestra la necesidad de adaptación y mitigación en este rubro. Las empresas agrícolas de mayor tamaño ya están adaptándose, por ejemplo, instalando mallas protectoras o reubicando cultivos hacia regiones más favorables para preservar la productividad a largo plazo [53]. Sin embargo, cambiar el lugar de producción no es una alternativa para los pequeños agricultores [54], los cuales deben buscar otras estrategias para enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

2.2.2. Desafíos del sector energético en la transición energética

Desde el año 2010, Chile ha logrado avances significativos a través de la expansión de tecnologías de generación de energía renovable. Durante el primer semestre de 2024, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) constituyeron el 40,6 % de la generación eléctrica del país [55]. A pesar de estos avances, el rápido crecimiento ha excedido con creces la capacidad de las redes de transmisión existentes, lo que ha llevado a que altas tasas de energía renovable no puedan ser inyectadas a la red (vertimiento). En promedio, el vertimiento de energías renovables entre abril del 2023 y abril del 2024 fue de un 13,5 % de la generación [56]. Por lo tanto, uno de los desafíos es acercar las zonas de generación a las de consumo, especialmente en la región centro, centro-sur y centro-norte de Chile.

Los grandes sistemas FV (Utility) representan la gran mayoría de la capacidad ERNC instalada en Chile, sin embargo, sigue existiendo potencial de expansión en el segmento del autoconsumo (Net Billing), así como en los Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD). Ya existen modelos de negocio en el segmento Net Billing sobre cómo una energía solar barata y limpia puede ahorrar dinero a los agricultores en su suministro eléctrico, donde dicho potencial se puede materializar a través de la AgriPV en terrenos agrícolas. Para suministrar energía a la red distribuida son clave los sistemas mas PMGD. Unos de los desafíos centrales consisten en ubicarse cerca de la infraestructura eléctrica existente, lo que dificulta la disponibilidad de terrenos adecuados para

su desarrollo.

2.2.3. Desafíos para los sistemas AgriPV

En el contexto de la implementación y comercialización del AgriPV en Chile, se han identificado retos a nivel económico, legislativo, de investigación y social.

Un desafío crucial es el costo elevado de la inversión inicial como resultado de la necesidad de adaptar los sistemas AgriPV a la agricultura, teniendo en cuenta parámetros como la luz requerida por los cultivos, la geometría de estos y la maquinaria agrícola. Estas adaptaciones pueden incrementar los costos de inversión y disminuir la generación eléctrica. A la vez, monetizar los efectos sinérgicos como la conservación de tierras agrícolas y la reducción en el uso de agua y plásticos es complejo, requiere de nuevos modelos de negocio. En Chile aún faltan mecanismos específicos en el mercado que compensen estos costos adicionales con las sinergias generadas.

Por otro lado, no existe una diferenciación legal entre los sistemas PV convencionales y el AgriPV, lo que complica la creación de un marco legal jurídico que facilite su comercialización y brinde seguridad a los inversionistas. En esta línea, la legislación actual sobre uso de suelo limita el desarrollo de proyectos AgriPV a gran escala en áreas agrícolas, al clasificar los terrenos en categorías específicas y exigir compensaciones para instalar paneles solares, incluso compatibles con la agricultura. Esto restringe su uso e impide aprovechar el potencial para la generación de energía limpia. Además, la actividad agrícola en los sistemas AgriPV es un reto normativo adicional, ya que el uso de la tierra para la generación de electricidad podría incentivar a los agricultores a priorizar la energía sobre la agricultura, sin incentivos adecuados para mantener ambas actividades.

El impulsar la comercialización del AgriPV en Chile implica fundamentalmente integrar disciplinas como la agronomía, el rubro FV, las ciencias sociales, económicas y medioambientales. Un enfoque inter y multidisciplinario es clave para diseñar sistemas que satisfagan las necesidades agrícolas locales y aborden desafíos energéticos específicos, considerando aspectos como el impacto del sombreado en los rendimientos agrícolas, la eficiencia hídrica y el impacto al suelo. Dicho esto, aunque el desarrollo global de AgriPV genera resultados prometedores, su adaptación a nivel local requiere la implementación de proyectos piloto y la validación del concepto en condiciones cli-

máticas específicas junto con diferentes tipos de cultivos. Hasta la fecha, en Chile existe un bajo nivel de investigación en este aspecto, en especial en materia de rendimiento de cultivos.

Finalmente, el desafío social incluye una asimetría de conocimientos y capacidad financiera entre los agentes de los sectores FV y agrícola. Dependiendo del modelo empresarial, los pequeños y medianos agricultores pueden correr el riesgo de suscribir contratos desfavorables por desconocimiento. Además, se pueden generar expectativas desmedidas respecto del valor potencial del terreno, ya que muchos productores no están familiarizados con la solución debido a la ausencia de modelos de negocios. Esta barrera subraya la necesidad de educar sobre la integración de la FV en la agricultura para demostrar los beneficios mutuos y así construir una base sólida de confianza en base de nuevos modelos de negocio entre los diversos actores implicados.

2.3. Revisión de políticas y regulaciones internacionales

A continuación, se desarrollará la revisión de políticas y regulaciones internacionales con tal de entender que han realizado otros países para aplicar el AgriPV y así poder entender mejor que se debe realizar según el contexto chileno.

2.3.1. Alemania

La tecnología agrivoltaica nace en Alemania, como una idea (1981), luego se investiga (2016) para luego ser una innovación (2019). El siguiente paso en Alemania es la implementación de una pequeña producción agrivoltaica, es así que nace la norma técnica DIN SPEC 91434 la cual describe los requisitos para el uso. La norma tiene los siguientes objetivos [57]:

- Elaborar un método de prueba para instalaciones agrivoltaicas que establezca un estándar en cuanto a las mediciones AgriPV. Este método servirá como referencia para la presentación de informes y documentación de proyectos ante organismos legislativos, entidades de financiación y autoridades reguladoras. Además, se utilizará para la verificación y certificación de las instalaciones AgriPV por parte de expertos y entidades certificadoras.

- Reducir significativamente el riesgo técnico de todas las partes involucradas en el proyecto (Agricultor, contratista EPC, comercializador de la instalación AgriPV y a la administración municipal reguladora).
- Permitir a expertos y a las organizaciones de ensayo y certificación la capacidad de asegurar el funcionamiento a largo plazo de las instalaciones AgriPV. Esto se realizará mediante la documentación necesaria que respalde la evaluación frente a organismos legislativos, entidades de financiación, inversores y compañías de seguros.
- Facilitar una descripción de la documentación estandarizada para los proyectos, unificar la presentación de informes de las instalaciones AgriPV, apoyar la gestión y mantenimiento en caso de cambio de operador y, en general, promover la calidad.
- Definir requisitos para las instalaciones AgriPV, con tal de minimizar el riesgo de instalaciones abusivas y los efectos de carga puntual asociada, así como las objeciones de la población a la aceptación de dicho tipo de instalaciones.

De esta manera, la DIN SPEC 91434 proporciona a los legisladores, organismos de financiación y autoridades reguladoras, una base para realizar pruebas y establece criterios de calidad para construir y operar sistemas AgriPV. Además, se establecen las bases para el desarrollo posterior de un método de prueba y la posible certificación de este tipo de sistemas. Cabe destacar que las especificaciones presentes en DIN SPEC 91434 cubren principalmente aspectos agrícolas técnicos del AgriPV, esto debido a que las normas técnicas relevantes para la energía solar FV ya existen y por lo tanto, pueden adoptarse para esta área de aplicación.

La Tabla 2.1 muestra las categorías definidas por la DIN SPEC 91434, donde se encuentra la Categoría I que abarca instalaciones AgriPV con un soporte elevado con altura libre, mientras que la Categoría II abarca instalaciones AgriPV con un soporte elevado cerca del nivel del suelo, con cultivos entre hileras. Las instalaciones AgriPV de ambas categorías pueden dividirse en cuatro categorías según el uso de la superficie del suelo agrícola, las cuales se señalan con letras A, B, C, D en la Tabla 2.1

Tabla 2.1: Resumen de categorías y formas de uso de la tierra según lo establecido en DIN SPEC 91434

Sistemas agrivoltaicos	Uso	Ejemplos
Categoría I: Soporte elevado con altura libre: *Agricultura bajo la instalación AgriPV*	**1A:** Cultivos permanentes y plurianuales	Frutas, bayas, viticultura, lúpulo
	1B: Cultivos anuales y de más de un año	Cultivos herbáceos, hortalizas, praderas alternas, forraje
	1C: Pastos permanentes con corte	Pastizales comerciales intensivos y extensivos
	1D: Pastos permanentes con pastoreo	Pastos permanentes, rotación de pastos (por ejemplo: bovinos, avícolas, ovinos, porcinos y caprinos)
Categoría II: Soporte elevado cerca del nivel del suelo: *Agricultura entre las hileras de la instalación AgriPV*	**2A:** Cultivos permanentes y plurianuales	Frutas, bayas, viticultura, lúpulo
	2B: Cultivos anuales y de más de un año	Cultivos herbáceos, hortalizas, praderas alternas, forraje
	2C: Pastos permanentes con corte	Pastizales comerciales intensivos y extensivos.
	2D: Pastos permanentes con pastoreo	Pastos permanentes, rotación de pastos (por ejemplo: bovinos, avícolas, ovinos, porcinos y caprinos)

Criterios y requisitos clave para el cultivo agrícola según DIN SPEC 91434

Un principio básico que aplica a todas las categorías es que la tierra utilizada para AgriPV debe seguir utilizándose para fines agrícolas. Se debe registrar una descripción más detallada de las actividades agrícolas en cada área AgriPV en una propuesta de cultivo agrícola. Los criterios y requisitos clave para la propuesta de cultivo agrícola son:

- Se mantendrá la anterior usabilidad agrícola del área, y la forma prevista del uso del suelo se establecerá en una propuesta de uso agrícola.
- La pérdida de terreno después de instalar el sistema FV no debe exceder el 10 % del área total del proyecto para la Categoría I y el 15 % para la Categoría II.
- La disponibilidad de luz, la homogeneidad de la luz y la disponibilidad del agua

deben controlarse y adaptarse a las necesidades de los productos agrícolas.

- Se deben tomar medidas para evitar la erosión del suelo y los daños causados por el diseño del sistema FV, el anclaje al suelo o la escorrentía de agua de los módulos FV.
- Se garantizará que el rendimiento agrícola después de la construcción del sistema AgriPV sea al menos el 66 % del rendimiento de referencia. El rendimiento de referencia se calcula usando el promedio de tres años de rendimientos de la misma tierra agrícola o usando datos comparables tomados de las publicaciones relevantes.
- Importancia de definir el AgriPV, en Francia existe una negación al respecto debido a que algunos proyectos tienen poca o ninguna producción agrícola [25].

Ventajas legales del AgriPV frente a la FV convencional

Por otro lado, el AgriPV actualmente posee varias ventajas legales en comparación con la FV convencional, estas son:

Condiciones para las subvenciones: Se pueden utilizar todos los terrenos agrícolas, mientras que la FV convencional solo dispone de terrenos de bajo valor agrícola, carreteras y ferrocarriles.

Planificación territorial: Los ayuntamientos favorecen al AgroPV a diferencia de la FV convencional en su planificación.

Permisos de construcción: Las pequeñas granjas FV de hasta 2,5 [ha] situadas junto a explotaciones agrícolas, gozan de privilegios según la ley de construcción.

Los terrenos con sistemas AgriPV siguen siendo terrenos agrícolas: El hecho de conservar el título de terreno agrícola implica que los subsidios agrícolas siguen disponibles y que el terreno usado está exento del impuesto sobre el patrimonio.

2.3.2. Italia

En el caso de Italia, las directrices para sistemas AgriPV fueron establecidas en junio de 2022, donde se distinguen entre sistemas **AgriPV simples** y **AgriPV avanzados** [58]. Los sistemas AgriPV simples son instalaciones FV que permiten continuar con el uso de una determinada parcela de tierra para el cultivo agrícola o la ganadería, mientras que los sistemas AgriPV avanzados, además de continuar con la actividad agrícola, tienen que cumplir condiciones específicas (reguladas en la versión actual del artículo 65 (1)-cuarto del Decreto Legislativo 1/2012):

- Utilización de soluciones combinadas innovadoras que consistan en módulos FV montados en postes con una cierta distancia al suelo, permitiendo también la rotación de los paneles, si es necesario, y, en su caso, que permita un cultivo agrícola más digital y preciso.
- Establecimiento de sistemas de supervisión para verificar el impacto de la instalación FV en los cultivos, el ahorro de agua, el cultivo agrícola en función del cultivo y la continuación de la actividad de los establecimientos agrícolas implicados.

Así pues, los sistemas AgriPV avanzados permiten utilizar el suelo directamente bajo los módulos con fines agrícolas, en lugar de utilizar únicamente el suelo entre las filas de módulos.

Sistemas AgriPV avanzados

La electricidad generada en un sistema agrivoltaico avanzado puede optar a determinadas subvenciones estatales, que no pueden obtenerse para los sistemas agrivoltaicos simples [58]

Las directrices mencionadas establecen, por ejemplo, que para poder optar a los fondos del PNRR (las subvenciones previstas en el plan nacional de recuperación), las instalaciones deben estar equipadas con mecanismos de supervisión adicionales que también permitan verificar la fertilidad del suelo, el microclima y la resiliencia frente al cambio climático [58].

El 14/04/2023, la MASE presentó un proyecto de decreto que regula los criterios y la

forma de utilización de las subvenciones para la instalación de sistemas AgriPV avanzados. El texto aprobado por la Comisión Europea hace unos días establece que las subvenciones se concederán hasta el 31/12/2024. Además, **se subvencionará la construcción y explotación de una capacidad total de 1,04 [GW] para la producción de al menos 1300 [GWh]**. La financiación se concede de la siguiente manera: **mediante un aporte de capital de hasta el 40 % del máximo de los costes subvencionables** (en total, se han destinado medios financieros por valor de 1.100 millones de euros); mediante una tarifa de apoyo abonada por la producción neta de la electricidad vertida a la red.

Empresarios agrícolas, cooperativas y otros entes pueden solicitar subvenciones para sistemas AgriPV avanzados, donde para esta categoría, se simplifican los procedimientos de autorización.

Autorizaciones para construcción

La autorización necesaria para la construcción y operación de una instalación de energías renovables (ER) varía según la capacidad del sistema, siendo más amplia para instalaciones de mayor generación eléctrica. En orden ascendente, se pueden obtener los siguientes tipos de autorizaciones: Comunicación de Inicio, Declaración Jurada de Inicio de Obras (DILA), Procedimiento Simplificado Municipal (PAS) y Autorización Única (UA) [58].

En áreas designadas como .ªpta"según el Decreto Legislativo nº. 199/2021, la construcción de instalaciones de ER ofrece beneficios significativos. En estos casos, se necesitaría una DILA para instalaciones de hasta 1 [MW], un PAS para instalaciones de más de 1 [MW] hasta 10 [MW], y UA para instalaciones con más de 10 MW de capacidad. No obstante, el artículo 6 (9-bis) del Decreto Legislativo nº 28/2011 **establece una exención específica para los sistemas AgriPV avanzados, permitiendo su autorización mediante PAS, aunque su potencia supere los 10 [MW], siempre que estén situados a una distancia inferior a 3 kilómetros de zonas de uso industrial, no industrial y comercial.**

Con la aprobación del decreto sobre zonas adecuadas, **los sistemas AgriPV avanzados se beneficiarán de una simplificación adicional de procedimientos**. Según el artículo 49 del Decreto Legislativo núm. 13 de 24/02/2023 (PNRR 3), estos sistemas podrán

considerarse al servicio de la actividad agraria y estar exentos de autorización si son construidos por empresarios agrarios o sociedades mixtas en las que participen productores de energía, siempre que los agricultores transfieran la empresa o rama de empresa correspondiente a los productores de energía, reservándose la gestión empresarial, **excepto en aspectos técnicos de explotación de la instalación y comercialización de la electricidad.**

Una vez alcanzados los umbrales determinados, las regiones tienen la posibilidad de clasificar las superficies restantes como "no aptas"para la instalación de sistemas FV. Esto haría imposible la instalación de más plantas de ER, pero se ha hecho una excepción explícita para los sistemas agrivoltaicos avanzados que, por lo tanto, aún pueden instalarse [58].

2.3.3. Japón

Japón ha implementado la tecnología de agrivoltaicos conocida como "solar sharing", una solución innovadora para abordar tanto la escasez de tierra disponible para energía solar como las necesidades de sostenibilidad en la agricultura.

La implementación de proyectos de agrivoltaicos en Japón ha requerido abordar diversos aspectos legales y regulatorios, que han sido clave para su expansión. El gobierno japonés ha establecido directrices específicas a través del Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) y la Organización de Desarrollo de Nuevas Energías y Tecnología Industrial (NEDO). Estas normativas incluyen restricciones como que las instalaciones no superen los 9 metros de altura y la necesidad de que los proyectos se planifiquen desde el principio con el objetivo de optimizar tanto la producción agrícola como la generación de energía. Se excluyen proyectos que no incluyan cultivos o ganado en su fase de planificación [59].

Incentivos y regulación del AgriPV

Uno de los principales incentivos para el desarrollo de agrivoltaicos ha sido el esquema de tarifas de alimentación (FIT), que garantiza a los agricultores ingresos adicionales por la venta de energía, junto con rebajas que cubren el 50 % de los costos iniciales. Las tierras agrícolas dedicadas a proyectos de agrivoltaicos también reciben beneficios

fiscales, ya que mantienen su clasificación como tierras de cultivo, lo que reduce significativamente los impuestos en comparación con otras formas de uso del suelo, como las instalaciones solares convencionales [60].

A nivel regulatorio, el desafío ha sido crear un equilibrio entre la protección de la producción agrícola y el impulso de las energías renovables, especialmente en un país con limitaciones de tierra como Japón. Además, las normativas ambientales han sido rigurosas para garantizar que los proyectos de agrivoltaicos no afecten negativamente al entorno agrícola y mantengan una integración sostenible con los ecosistemas locales [61]. Por otro lado, el gobierno japonés ha reconocido que la integración de paneles solares en tierras agrícolas puede ser una forma efectiva de generar energía sin sacrificar la producción de alimentos. Para ello, el Ministerio de Agricultura, Silvicultura y Pesca (MAFF) permite que las tierras agrícolas sigan siendo utilizadas para cultivos bajo ciertas condiciones, incluso con la presencia de paneles solares [61].

En general, Japón ha logrado flexibilizar sus regulaciones para facilitar el crecimiento de este sector, al mismo tiempo que impone controles para asegurar que las tierras agrícolas se utilicen de manera óptima tanto para la producción de alimentos como para la energía solar.

2.3.4. Francia

En el caso de Francia, la llamada agrivoltaica nace a partir de la ambición de alcanzar los objetivos marcados por la ley de transición energética, sin que este desarrollo pase a llevar la necesidad de preservar suelos agrícolas. Es así que se procura definir a la agrivoltaica como instalaciones FV que permiten combinar la producción FV secundaria con la producción agrícola principal con una sinergia operativa demostrable.

Para definir con precisión la noción de agrivoltaica, es que se desarrollaron las siguientes actividades en orden cronológico hasta el 2021 [10]:

1. Constitución de un comité de expertos dedicados.
2. Realización de estado del arte bibliográfico acerca de la agrivoltaica.
3. Entrevistas con agricultores y promotores FV.
4. Análisis para clasificación de proyectos.

5. Capitalización: escribir informes.

De las actividades 2, 3 y 4 se desprendieron resultados, los cuales se detallan a continuación.

2.3.4.1. Resultados del estado del arte

- La producción FV es limitada por la producción de cultivos lo que implica un menor rendimiento FV, lo que deriva en mayores costos de producción (LCOE - Costo nivelado de energía)
- La producción agrícola depende de cuatro factores: radiación solar, temperatura, evapotranspiración y eficiencia hídrica. Al existir una combinación de agricultura con FV, la contribución de dichos factores varía, provocando diversos efectos (positivos o negativos) sobre el rendimiento, calidad y homogeneidad del cultivo.
- La reducción de luz ligada a la presencia de módulos FV constituye a la principal limitación ecofisiológica sobre la productividad de las plantas. Aumentar el sombreado tiene consecuencias negativas (en general) para el crecimiento de las plantas.
- La reducción de la evapotranspiración, debido al sombreamiento, puede tener efectos beneficiosos, entre ellos la mejora de la eficiencia hídrica, especialmente en condiciones de ola de calor. El aumento de la eficiencia hídrica puede contrarrestar los efectos de la sombra y el rendimiento puede ser mayor al obtenido sin paneles FV.
- En contexto de cambio climático y escasez de recursos hídricos, los módulos FV tienen un papel potencial en la mitigación del estrés climático y el ahorro de agua en el futuro.
- Los resultados obtenidos sobre rendimientos dependen en gran medida de las condiciones pedoclimáticas de los proyectos, de las especies y variedades cultivadas, así como de las características de las estructuras FV asociadas.

2.3.4.2. Resultados de entrevistas a agricultores y promotores FV

- Existen dificultades frecuentemente reportadas por agricultores:

1. Falta de conocimiento sobre los efectos de la sombra en los cultivos.

2. Escasez de retroalimentación acerca de cultivos, lo que deriva en la dificultad de capitalizar experiencias anteriores y posteriormente en experimentar por si solos.

3. Falta de asesoramiento y apoyo de los promotores y estructuradores sobre la implementación de métodos de cultivo y las variedades previstas de estos.

- Los comentarios recopilados muestran cambios potencialmente profundos en los itinerarios técnicos y en la producción agrícola, en especial cuando esta es llevada bajo los módulos FV.

- Los beneficios financieros asociados a este tipo de proyectos pueden generar riesgos de especulación inmobiliaria.

- Según los agricultores entrevistados, las principales ventajas son:

  1. El acceso a estructuras agrícolas a coste cero o menor.

  2. El acceso a terrenos adicionales.

  3. La protección contra diversos riesgos (sobre todo meteorológicos).

  4. El apoyo económico para el desarrollo de terrenos con limitaciones o la perpetuación de una explotación.

2.3.4.3. Resultados del análisis para clasificación de proyectos

Un análisis transversal de diferentes sistemas y un mapeo de las diferentes interacciones entre la producción agrícola y la producción FV permitió definir criterios que pueden caracterizar estos proyectos.

Criterios de calificación: Criterios que caracterizan las sinergias agrícolas entre la producción FV y agrícola.

Criterios de atención: Criterios que examinan dimensiones adicionales del proyecto para evaluar coherencia, relevancia global y cuestionar su solidez, además de identificar posibles áreas de fragilidad.

Criterios de calificación

Hay tres criterios de calificación que categorizan y priorizan proyectos en términos de sinergia, por lo que se identifican proyectos y asociaciones agrivoltaicas de interés. Estos criterios deben evaluarse uno tras otro para permitir que los proyectos se posiciones en el gradiente de clasificación que se presenta a continuación.

Criterio N°1 - Servicio prestado a la producción agrícola

Este criterio busca responder a las preguntas: *¿El proyecto FV brinda un servicio a la operación? ¿De qué naturaleza?"*

Para justificar su presencia en terrenos agrícolas, una instalación agrivoltaica debe responder a una necesidad expresada por el agricultor y proporcionar sinergia agrícola entre la producción FV y agrícola, proporcionando un servicio agronómico. Estos servicios pueden ser de diferente naturaleza e implicar interacciones agronómicas más o menos fuertes en la explotación agrícola. Por lo tanto, fueron priorizados en 4 categorías:

Categoría 1 - Servicios directos a escala de parcela: Adaptación al cambio climático, protección contra amenazas (en particular, climáticas), mejora del bienestar animal o servicio agronómico específico para las necesidades de los cultivos (limitación de estrés hídrico, etc).

Categoría 2 - Servicios indirectos a escala de parcela: Acceso a equipamiento técnico con FV, es decir, técnicas tradicionalmente utilizadas en el sector agrícola que pueden implementarse en funcionamiento pero añadiendo módulos PV, tales como invernaderos, naves ganaderas, graneros, etc.

Categoría 3 - Otros servicios: Servicios prestados a escala agrícola o desconectados de la agronomía, tales como: acceso a terreno adicional, sostenibilidad de la operación, provisión de ingresos adicionales, mejora de las condiciones laborales, etc.

Categoría 4 - No se proporciona ningún servicio.

Este primer criterio es clave para definir AgriPV, ya que **sólo los acoplamientos que proporcionen la Categoría 1, pueden reclamar una calificación de agrivoltaica.**

En cuanto a los servicios, es imprescindible que este sea:

- Argumentado, al responder a una necesidad agrícola justificada.

- Comprobado, mediante resultados demostrados (retroalimentación bibliográfica convincente): mejora de la calidad o cantidad de producción, reducción de determinadas pérdidas en el campo, reducción de determinados insumos, etc. La justificación por provisión de sombra, protección de cultivos, etc no es suficiente por si sola.
- Y que no induzca transferencias de impactos a otras dimensiones del proyecto.

Criterio N°2 - Impacto en la producción agrícola

Este segundo criterio pretende responder a la siguiente pregunta: *¿Qué impacto tiene el sistema FV en la producción agrícola (rendimiento cuantitativo y cualitativo)?*

De este modo, se evalúa el impacto del sistema FV en la producción agrícola, tanto en las cantidades producidas como en la calidad de la producción, en comparación con una producción agrícola idéntica sin sistema FV. La evaluación se lleva a cabo con tres indicadores.

- Mejora de la producción agrícola.
- Mantenimiento o degradación aceptable.
- Degradación significativa.

Sólo los acoplamientos que permitan mejorar la producción agrícola o el mantenimiento o degradación aceptable de la producción, pueden reclamar una calificación de agrivoltaica.

Criterio N°3 - Impacto en la renta agrícola

El tercer criterio busca responder a la siguiente pregunta: *¿Cuál es el impacto del sistema FV en los ingresos agrícolas?*

Este criterio obliga a realizar una evaluación antes y después de la instalación del proyecto FV, es decir, se comparan los ingresos de la operación en su conjunto tras la implementación FV con los ingresos disponibles para la explotación antes de la implementación FV.

Además, se distingue entre la evolución de los ingresos agrarios de la explotación y los ingresos potenciales que se pueden añadir gracias a la producción eléctrica. La evaluación se realiza mediante cinco indicadores.

- Mejora de ingresos agrícolas, sin pérdida de ingresos agrícolas.
- Mantener los ingresos agrícolas sin pérdida de ingresos agrícolas.
- Mejora general de los ingresos a pesar de pérdida de ingresos agrícolas.
- Pérdida de ingresos agrícolas compensada por otros ingresos.
- Reducción de ingresos operativos.

Mantener o incluso mejorar los ingresos agrícolas es esencial para poder optar a una cualificación agrivoltaica

Se excluye de la definición de agrivoltaica el caso en el que aumenten los ingresos globales de la explotación, con una disminución de los ingresos agrícolas compensada por un aumento de los ingresos vinculados a la instalación FV.

2.3.4.4. Gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola

A partir de los tres criterios anteriores se formó un gradiente de clasificación de proyectos FV en terrenos agrícolas desde los menos virtuosos hasta los más compatibles en términos de sinergia agrícola (Figura 2.1 o A.1 con mayor tamaño). Este gradiente permite una categorización de los proyectos utilizando los tres criterios presentados anteriormente. El objetivo es que se use como árbol de decisión, partiendo de la evaluación del criterio n°1, luego bajando al criterio n°2 para llegar a la evaluación del criterio n°3 de calificación del proyecto. En general, los proyectos ubicados más a la izquierda del gradiente corresponden a proyectos donde no hay sinergia, mientras que los proyectos ubicados a la derecha del gradiente son los proyectos donde la sinergia es más fuerte. Es importante mencionar que este gradiente no incluye los criterios de atención, los cuales deben estudiarse posteriormente para garantizar la pertinencia y coherencia global del proyecto.

2.3.4.5. Definición de Agrivoltaísmo y regulación del AgriPV

A continuación se hace mención al artículo L314-36, Creado por la Ley n°2023-175 de 10 de marzo de 2023 - art. 54 [62], con el objetivo de dar a conocer legalmente parte de lo que se ha hecho en Francia.

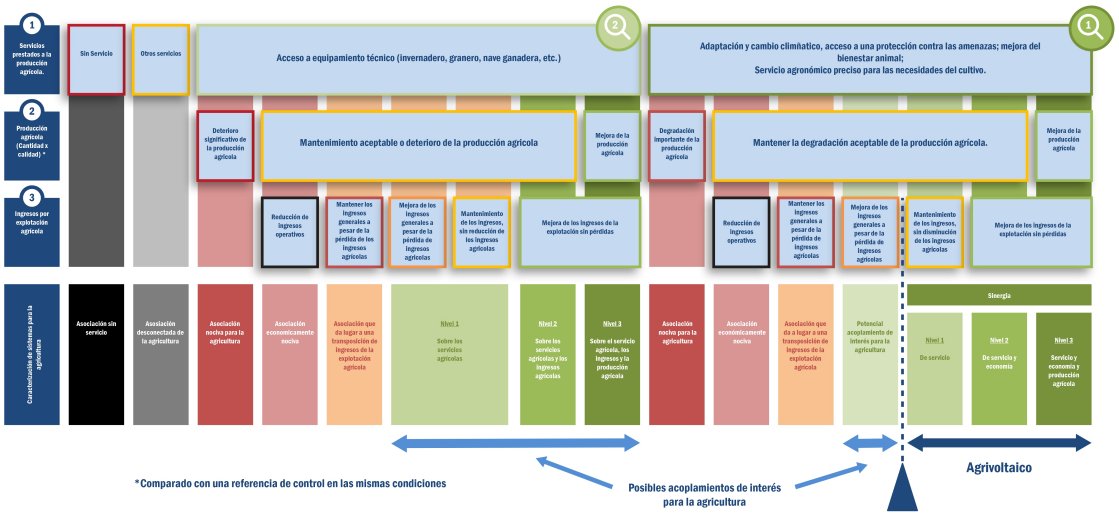


Figura 2.1: Gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola, traducido de ADEME [10].

I. Una instalación agrivoltaica es una instalación de producción de electricidad que utiliza la energía radiativa del sol y cuyos módulos están situados en una parcela agrícola donde contribuyen de forma duradera a la instalación, al mantenimiento o al desarrollo de la producción agrícola.

II. Se considera que una instalación es agrivoltaica si proporciona al menos uno de los siguientes servicios directamente a la parcela agrícola, garantizando a un agricultor en activo o a una granja educativa gestionada por un establecimiento incluido en el Título I del Libro VIII del Código Rural y de Pesca Marítima una producción agrícola significativa y unos ingresos sostenibles derivados de la misma:

1. Mejora del potencial agronómico y del impacto.
2. Adaptación al cambio climático.
3. Protección contra los riesgos.
4. Mejora del bienestar animal.

III. Una instalación no podrá considerarse agrovoltaica si perjudica sustancialmente a uno de los servicios mencionados en 1° a 4° de II, o si perjudica sólo a dos de estos servicios.

IV. Una instalación no puede considerarse agrivoltaica si presenta al menos una de las características siguientes:

1. No permite que la producción agrícola sea la actividad principal de la parcela agrícola.

2. No es reversible.

V. Un decreto del Conseil d'Etat determina la aplicación de este artículo. Especifica las prestaciones mencionadas en los apartados 1° a 4° del II, así como una metodología que define la producción agrícola significativa y la renta sostenible derivada de la misma. El hecho de que la producción agrícola se considere la actividad principal mencionada en el 1° del IV puede evaluarse en términos de volumen de producción, nivel de renta o superficie. Asimismo, establece las condiciones de implantación y de control de la agro-silvicultura, basadas en el estricto respeto de las normas que rigen el mercado de las tierras agrícolas, en particular el estatuto de arrendatario y las competencias de las sociedades de ordenación del territorio y de implantación rural, la política de renovación generacional y el mantenimiento del potencial agronómico actual y futuro de las tierras en cuestión. Por último, el decreto establece las modalidades de seguimiento y control de las instalaciones, así como las sanciones en caso de incumplimiento.

De esta manera, Francia estableció un proceso para la implementación del AgriPV en su país, el cuál culmina creando la definición de *Agrivoltaismo*, separando legalmente el AgriPV de la FV convencional, manteniendo el uso agrícola de la explotación.

2.3.5. USA

En Estados Unidos, la implementación de la AgriPV ha avanzado gracias a la combinación de esfuerzos federales, estatales y privados. El Departamento de Energía de EE. UU. (DOE) ha desempeñado un papel clave a través del programa FARMS (Investigación agrivoltaica a Escala de MW), que ha destinado 8 millones de dólares a proyectos distribuidos en seis estados, incluyendo Iowa, Nueva Jersey, Ohio, Alaska y Arizona [63]. Estos proyectos buscan desarrollar modelos replicables que maximicen los beneficios económicos tanto para los agricultores como para las comunidades rurales, a la vez que contribuyen a los objetivos de energía limpia.

A nivel estatal, Massachusetts ha sido pionera en la regulación de proyectos AgriPV a través de su programa SMART (Solar Massachusetts Renewable Target), que ofrece incentivos financieros a proyectos que integran energía solar con la producción agrícola [64].

La adopción de la AgriPV en Estados Unidos está impulsada por diversas motivaciones. La principal es la necesidad de cumplir con los objetivos de energía renovable establecidos a nivel nacional y estatal, que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar las fuentes de energía. En este sentido, la AgriPV permite que los agricultores se conviertan en "pro-sumidores", es decir, tanto productores como consumidores de energía limpia, además de hacer uso dual de la tierra con esta tecnología [63].

Barreras para la implementación

A pesar del potencial que ofrece la AgriPV, existen varios desafíos que dificultan su adopción masiva. Una de las barreras principales es la incertidumbre sobre la productividad a largo plazo de la tierra donde se implementan estos proyectos. Los agricultores han expresado preocupaciones acerca de cómo la sombra generada por los paneles solares podría afectar el crecimiento de ciertos cultivos o la cría de ganado. A esto se suma la falta de sistemas flexibles que se adapten a diferentes tipos de explotaciones agrícolas y escalas de producción [65].

Otra barrera importante es la compensación económica para los agricultores. Muchos de ellos consideran que los modelos actuales de compensación no reflejan adecuadamente los beneficios económicos que la energía solar aporta, por lo que exigen un pago más justo por el uso de sus tierras para estos proyectos. Además, existe una falta de infraestructura y conocimientos técnicos en las zonas rurales, lo que dificulta la adopción a gran escala de esta tecnología [65].

Regulación del AgriPV

En términos de regulación, Estados Unidos ha adoptado un enfoque descentralizado. A nivel federal, el DOE está proporcionando financiamiento y creando asociaciones entre los sectores agrícola y energético. Por ejemplo, el proyecto de "Solar and Storage Industries Institute"se enfoca en reducir las barreras de implementación y maximizar los beneficios para agricultores, cooperativas eléctricas y desarrolladores de energía solar. Este proyecto también busca resolver cuestiones legales y económicas relacionadas con la instalación de sistemas AgriPV [63].

A nivel estatal, programas como el de Massachusetts han demostrado que la regulación puede fomentar el crecimiento de la AgriPV mediante incentivos financieros específicos para este tipo de proyectos [64]. Sin embargo, aún se necesita una mayor coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y los sectores implicados para acelerar la adopción de la AgriPV en todo el país.

2.3.6. China

China ha estado a la vanguardia en la implementación de la tecnología AgriPV desde 2011, integrando más de 500 proyectos que combinan la producción agrícola con la generación de energía solar. Los proyectos más destacados incluyen el cultivo de bayas de goji bajo paneles solares en Ningxia [66] y la integración de paneles solares en invernaderos en Hainan [67].

La tecnología AgriPV en China se ha centrado principalmente en regiones áridas y semiáridas, donde la competencia por el uso del suelo es alta. En proyectos como el parque solar en Ningxia, se ha logrado revitalizar tierras desertificadas mediante la plantación de cultivos bajo paneles solares. Este enfoque no solo mejora la eficiencia de la tierra, sino que también contribuye a la mejora del ecosistema local, ayudando a reducir la evaporación del agua y aumentando la cobertura vegetal [66].

Barreras para la implementación

Una de las principales barreras para la implementación de la tecnología AgriPV en China es la integración con la red eléctrica, un desafío crucial que ha limitado el crecimiento de los proyectos de energías renovables. Aunque la Administración Nacional de Energía (NEA) ha implementado políticas para mejorar las tasas de utilización de proyectos solares y eólicos, la infraestructura de transmisión sigue siendo insuficiente, especialmente en regiones rurales y remotas donde se encuentran muchos proyectos AgriPV [68].

A pesar de los esfuerzos de la Administración Nacional de Energía (NEA) para mejorar la integración de las renovables y establecer tasas de utilización del 90 %, el progreso ha sido lento debido a los altos costos y la insuficiencia de las infraestructuras en las regiones remotas [68].

Regulación del AgriPV

La Ley de Energía Renovable de China ha sido fundamental en la expansión de tecnologías como la AgriPV, proporcionando incentivos clave como tarifas garantizadas (feed-in tariffs) para la venta de energía solar y asegurando la conexión obligatoria de proyectos renovables a la red eléctrica [69]. Esta ley establece que los desarrolladores de energía renovable que obtengan los permisos necesarios tienen garantizado el acceso a la red, lo que facilita la comercialización de la electricidad a precios regulados por el Consejo de Estado [69].

El gobierno chino ha implementado también programas piloto específicos para fomentar el uso de energías renovables en áreas rurales. Estos programas incluyen subsidios destinados a mejorar la infraestructura agrícola y energética, favoreciendo la adopción de tecnologías como AgriPV [69]. Además, la investigación y el desarrollo en esta área han sido priorizados dentro de los planes nacionales para promover la industrialización de tecnologías de energía limpia.

En resumen, la ley no solo facilita el desarrollo de proyectos a gran escala, sino que también apoya la modernización y expansión de la infraestructura en las áreas rurales, ayudando al desarrollo sostenible en China mediante tecnologías como el AgriPV.

2.4. Conclusiones y recomendaciones para la regulación del AgriPV en Chile

El trabajo junto a expertos del área AgriPV deriva en conclusiones y recomendaciones políticas que apoyan la regulación del AgriPV en Chile. Estas recomendaciones resultan en el documento tipo *Policy Brief*, llamado *AgriPV: Uso compartido de suelos para la agricultura y generación de energía solar fotovoltaica*, que se encuentra en el Apendix 4.2.4. Este documento resalta la importancia del AgriPV como tecnología innovadora que puede aumentar la resiliencia climática de los cultivos, teniendo en cuenta las barreras que existen para su implementación. Este documento fue presentado al Ministerio de Energía y entidades del Ministerio de Agricultura; presentado en la Expo Agro del año 2024 y expuesto en una sesión del CORE de la región de Valparaíso.

Con el objetivo de diseñar marcos regulatorios que apoyen el desarrollo del AgriPV se han identificado tres ejes de acción:

- Marco jurídico.
- Incentivos financieros.
- Red de actores.

A continuación, se describirán recomendaciones para los tres ejes de acción ya mencionados.

2.4.1. Marco jurídico

2.4.1.1. Diferenciar el AgriPV de la FV convencional

Comparativa internacional

En el ámbito internacional se observa una variedad de enfoques para establecer un marco legal y con ello un ecosistema habilitador para el AgriPV. Un paso inicial crítico consiste en: 1. definir formalmente al AgriPV, 2. clarificar cómo se distingue de los sistemas FV convencionales y 3. derivar en qué contextos específicos su implementación resulta apropiada. Una definición inicial es fundamental para considerar el enfoque en los

marcos legales pertinentes relacionados con el uso de suelo, permisos de construcción y legislaciones vinculadas con la generación de energía. En 2021, Alemania adoptó la normativa DINSPEC 91434 que estableció un máximo de entre 10 % y 15 % de reducción de superficie de cultivo [57]. En tanto, Francia definió una guía para los sistemas AgriPV [10] que fue la base para su adaptación legal bajo el Decreto nº 2024-318 de 2024 que introdujo metas numéricas relacionadas a la cantidad de cosecha y densidad de paneles [62]. En Italia se aplicó un enfoque mixto entre objetivos y requisitos técnicos mínimos [58].

Recomendación para Chile

Siguiendo los enfoques internacionales, **se sugiere definir el AgriPV a través de una combinación de parámetros técnicos y objetivos numéricos medibles, adaptados al contexto chileno**. El objetivo principal debe ser la protección de las tierras de cultivo y la promoción de la tecnología en los casos donde el AgriPV pueda ofrecer sus mayores beneficios agrícolas y socioeconómicos. **Se recomienda definir un máximo de reducción de terreno cultivable acorde a la realidad chilena**. Por ejemplo en Alemania se sugiere una reducción de entre un 10 % y 15 % en función de su propio contexto. Una definición por objetivos puede garantizar que los sistemas se implementen en áreas gravemente afectadas por la sequía o la desertificación, así como en regiones caracterizadas por pobreza de recursos hídricos y energéticos.

2.4.1.2. Definir el tipo uso de suelo de AgriPV en la normativa ambiental

Comparativa internacional

Considerando que el sistema AgriPV combina dos tipos diferentes de producción en un solo tipo de suelo, Japón introdujo por directriz una nueva clase de uso del suelo para el uso dual [61]. Por su parte, Alemania mantuvo el estatus de uso agrícola según el plan de utilización de suelo [18]. En Israel, en tanto, se gestiona el desarrollo geoespacial a través de la definición de zonas. Si una superficie ya se encuentra zonificada para AgriPV, el uso previsto de la tierra no puede cambiarse de agrícola sin penalización [18].

Recomendación para Chile

Para el contexto chileno se propone mantener el uso de suelo agrícola en sistemas AgriPV por la continuidad de la utilización agrícola. El principio rector en este caso es la comparación con la instalación de estructuras de malla sombra fijas, en las que también se mantiene el uso agrícola. Otra oportunidad relevante para regular la implementación de AgriPV se identifica a través del sistema existente, administrado por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) gestionado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que evalúa el impacto al recurso suelo de los proyectos. Se propone usar la definición técnica recomendada en su punto 4.1.1 (p.ej. reducción de porcentaje de superficie agrícola), ofreciendo a las autoridades un esquema claro de evaluación para determinar si los proyectos cumplen con el nivel de beneficio y garantizando que el terreno agrícola pueda reutilizarse de forma normal tras la vida útil del sistema. Al conservar la clase el terreno agrícola, también se pueden mantener las mismas directrices fiscales para la producción agrícola.

Este enfoque permitiría una evaluación exhaustiva de cada propuesta de proyecto, asegurando beneficios para la actividad agrícola. **Se sugiere utilizar la definición técnica AgriPV en la normativa ambiental y sectorial aplicable para mantener el uso de suelo y así la continuidad de la actividad agrícola**. Además, considerando el impacto en el rendimiento agrícola y la pérdida de tierras productivas, podrían definirse medidas ambientales adecuadas, que serían mínimas por la continuidad de los cultivos.

2.4.1.3. Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola

Comparativa internacional

En Alemania se permite la construcción de sistemas AgriPV en tierras agrícolas mediante un privilegio especial si el proyecto comprueba servir directamente a una explotación agrícola o forestal [18]. Es notable que en países de gran extensión territorial como Brasil y en algunas regiones de los Estados Unidos, no existen barreras legislativas que impidan la integración de sistemas FV con actividades agrícolas.

Recomendación para Chile

Una oportunidad para implementar el sistema AgriPV en Chile lo otorga el Informe de Factibilidad de Construcción (IFC), que en áreas rurales otorga a propietarios de predios la posibilidad de realizar construcciones ajenas a la agricultura, siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas en la normativa y no se produzcan actividades incompatibles o nocivas para la agricultura de una zona determinada. El informe se fundamenta en el Artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y construcciones, Decreto 458, Ley 458. Los criterios para aplicar esta norma se encuentran contenidos en la Circular 296/2019 del SAG, la que establece criterios técnicos y otros complementarios a considerar: En cuanto a las competencias del SAG, el trámite consiste en que el propietario de un predio agrícola le solicite el IFC, presentando una serie de documentos. El SAG elabora un informe técnico basado en excavaciones y un análisis de las condiciones del entorno predial considerando la vocación agropecuaria del predio. Este informe evaluará suelos de alta prioridad agrícola clasificados en las categorías I, II y III, y eventualmente IV y VI, y forma la base de información para evaluar la autorización del proyecto.

En este contexto, **se recomienda considerar la inclusión del AgriPV como una instalación compatible y beneficiosa con una función directa de servicio para la agricultura**, debido a sus funcionalidades de adaptación al cambio climático y su factibilidad de ser integrada con la producción agrícola. Es fundamental prestar especial atención al concepto de "servicio" en este análisis, lo que supone que será clave asegurar que el sistema AgriPV cumple funciones beneficiosas para la agricultura. Al considerar el AgriPV como una excepción al IFC se pueden crear beneficios relevantes para el desarrollo de este tipo de iniciativas por la disminución de la incertidumbre en el desarrollo de estos proyectos.

2.4.1.4. Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV

Comparativa internacional

Para garantizar la continuidad de las actividades agrícolas en los sistemas AgriPV, se implementan incentivos financieros y mecanismos de supervisión en el nivel interna-

cional. En Japón, un mecanismo estatal evalúa la actividad agrícola y el impacto de la sombra de los sistemas AgriPV en los rendimientos [61]. En Francia, se requiere reportar los resultados agrícolas a una institución de supervisión [10], mientras que Israel planea crear una unidad para asegurar el cumplimiento de la normativa AgriPV. En Europa, se reformularon las subvenciones agrícolas para que también cubran las tierras de doble uso, promoviendo su viabilidad económica [70]. Además, se identifica como factible solo promover sistemas AgriPV en sectores agrícolas particulares en los cuales haya un potencial alto de sinergia y un valor agregado elevado que haga improbable abandonar las actividades agrícolas. Este enfoque se implementó en Croacia, dónde se apoya la regulación a la implementación de AgriPV en la fruticultura [71].

Recomendación para Chile

En el contexto chileno **actualmente existe un sistema de control y seguimiento de aquellos compromisos ambientales adquiridos en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA)**, a través de la la Superintendencia Del Medio Ambiente (SMA). Mientras que se podría considerar el ejemplo del proyecto a cargo del SAG. El enfoque utilizado en el proyecto "Ayla Solar" de O'Energy (SEIA, 2020), donde se estableció un mecanismo para documentar los rendimientos de las cosechas, podría servir como modelo para esto. Como opción, AgriPV puede recibir incentivos solo para la fruticultura, donde hay un alto nivel de valor agregado y poca probabilidad de que se abandone la producción agrícola. En general, **se propone establecer un límite máximo porcentual en la proporción de terreno que un agricultor individual puede destinar a la implementación de sistemas AgriPV**, garantizando que la producción agrícola permanezca como la principal fuente de ingresos. Se sugiere que estos porcentajes oscilen entre el 10 % y el 30 %. Además, se propone que las instituciones y los actores clave acuerden y validen conjuntamente los valores sugeridos, asegurando así una base consensuada y robusta para la evaluación.

2.4.2. Incentivos financieros

2.4.2.1. Considerar el AgriPV como una medida de compensación para proyectos por su impacto positivo en la eficiencia hídrica

Comparativa internacional

En Francia, se realizó un gradiente según criterios de calificación 2.1, donde dichos criterios responden a las siguientes preguntas:

- Criterio 1: ¿El proyecto AgriPV brinda un servicio a la operación?, ¿de qué naturaleza?
- Criterio 2: ¿Qué impacto tiene el sistema AgriPV en la producción agrícola (rendimiento cuantitativo y cualitativo)?
- Criterio 3: ¿Cuál es el impacto del sistema AgriPV en los ingresos agrícolas?

Al responder estas preguntas, se categoriza por separado mediante cada criterio al proyecto en cuestión y permite categorizar de manera general los sistemas AgriPV acorde al nivel de sinergia agrícola que presenten, desde los menos hasta los más virtuosos [10]. De esta manera, se puede observar el nivel de sinergia que presenta un proyecto en específico y, por lo tanto, dimensionar el nivel de impacto positivo que tendría para la explotación agrícola.

Por otro lado, esta herramienta es útil para medir los impactos positivos y negativos que presentan los proyectos AgriPV, donde, conforme existan menos impactos ambientales negativos, el proyecto será más sustentable y tendrá que presentar menos medidas ambientales.

Recomendación para Chile

Para la implementación de sistemas AgriPV se recomienda clasificar los proyectos que entren al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de manera similar al caso francés, es decir, clasificar los proyectos según las sinergias agrícolas que presenten. El objetivo consiste en que el SEIA sea capaz de contraponer las medidas de compensación asociadas al proyecto con las sinergias agrícolas presentadas por la

tecnología. Por ejemplo, si un proyecto AgriPV ocupa el 10 % del terreno y dispone de 90 % para la producción agrícola, teóricamente se debiese compensar el uso del 10 % de terreno de la construcción FV (asumiendo que se mantiene el uso de suelo agrícola). No obstante, a lo largo del texto se exponen los beneficios que la tecnología puede presentar y que mediante una clasificación como la de Francia, se puede discernir si las sinergias entregadas por un proyecto AgriPV son altas, medias, bajas o nulas (o con mayores precisiones). Con esto en mente, un sistema AgriPV podría compensar por sí solo los impactos ambientales que genere mediante las sinergias que presenta para la agricultura, adaptando el cultivo al cambio climático, mejorando la producción agrícola, reduciendo el consumo de agua y mejorando los ingresos agrícolas, entre otros.

2.4.2.2. Establecer concursos de innovación de AgriPV que permitan monetizar las sinergias de la tecnología

Comparativa internacional

Para compensar costos adicionales del AgriPV se introdujeron distintas medidas en varios países. Desde 2017 hay licitaciones separadas para el AgriPV en Francia, donde el objetivo es alcanzar 15 [MWp] de capacidad instalada al año. Las adjudicaciones se basan, por una parte, en el precio ofrecido y, por otra, en el potencial sinérgico para la agricultura. El tamaño máximo de un proyecto es de 3 [MWp] de capacidad instalada y los proyectos que reciben subvenciones tienen garantizada una tarifa regulada durante 20 años. Desde 2018, en Massachusetts, Estados Unidos, el Estado concede subvenciones para los sistemas que se construyen en zonas designadas para la agricultura y no superan los 5 [MWp]. En Alemania, la tecnología se promovió inicialmente a través de concursos de innovación y se incluye en la Ley de Energías Renovables, y se define una prima tecnológica, que se paga como subvención fija sobre la cantidad de electricidad vendida para monetizar las sinergias creadas por la tecnología [18].

Recomendación para Chile

Todavía no existe una promoción específica del AgriPV en los países latinoamericanos, lo que demuestra el potencial de Chile para desempeñar un papel pionero. A partir de esto, **se recomienda diseñar incentivos financieros que reconozcan las sinergias y**

beneficios a través de mecanismos y concursos presentes en el ecosistema chileno. La Ley N°18.450 de Fomento al Riego y Drenaje en Chile corresponde a una buena práctica que ofrece una oportunidad para financiar la integración de sistemas AgriPV con la instalación o mejora de sistemas de riego. Esta ley fue actualizada en 2023 y permite el fomento de la inversión privada de obras de riego y drenaje, es administrada por la Comisión Nacional de Riego (CNR), institución que emplea un calendario anual de concursos que permite distribuir los recursos para el cofinanciamiento de obras menores (hasta 20.000 UF), obras medianas intra-prediales (desde 20.000 hasta 60.000 UF), obras medianas para organizaciones de regantes (desde 20.000 hasta 100.000 UF) y programas especiales, como son la pequeña agricultura (hasta 1.000 UF) entre otros. Este enfoque de financiación puede cubrir hasta el 95 % de la inversión para pequeños agricultores y se otorga por reembolso al concluir el proyecto, es una prometedora forma de promover la integración de AgriPV con todos sus beneficios. **Además, se sugiere, generar grupos dentro de los concursos de la Ley de Riego dedicados para proyectos AgriPV, o bien, permitir factores que favorezcan las condiciones de parámetros concursales de este tipo de proyectos respecto a fotovoltaicos convencionales:** Por ejemplo, formular factores que valoricen la superficie agrícola ahorrada por estos proyectos, además de cuantificar el ahorro de agua y el equivalente de ambos parámetros en una nueva superficie potencial para riego. Lo anterior, permitirá mejorar las condiciones de postulación a los recursos de la Ley de Riego de este tipo de iniciativas.

Por otro lado, el Ministerio de Hacienda de Chile ha establecido un Green Bond Framework para emitir bonos verdes, sociales y sostenibles, orientados a promover una transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima. Dentro del presupuesto del gobierno central, los gastos elegibles incluyen exenciones fiscales y subsidios. Se ofrece financiamiento a entidades que apoyan estrategias ambientales, sociales y climáticas del país, incluyendo inversiones en infraestructura e innovación. Se ha diseñado un proceso de decisión para determinar la elegibilidad de proyectos dentro del "Marco de Bonos Sostenibles", que considera objetivos específicos y criterios de elegibilidad y exclusión. En este contexto, **se recomienda evaluar la tecnología AgriPV para financiar proyectos modelo, dado que combina beneficios energéticos, ambientales y sociales, ofreciendo una solución integral para áreas rurales**.

2.4.3. Red de actores

2.4.3.1. Mesa de trabajo AgriPV

Para abordar las cuestiones legislativas y utilizar así los beneficios socioeconómicos de la tecnología AgriPV de forma políticamente controlada, se recomienda la formación de una mesa de trabajo con actores multidisciplinarios, incluyendo al SAG, el Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Riego, empresas de los rubros, y entidades de la academia. Alineado a la experiencia internacional, se subraya la importancia de la implicación de las instituciones del sector agrícola para desarrollar el AgriPV de cara a los retos presentes en la agricultura chilena.

2.4.3.2. Considerar el AgriPV en convocatorias i+D+i

Se propone la creación de fondos de I+D+i gestionados por entidades como CORFO o ANID, en colaboración entre universidades, institutos de investigación y socios industriales. Estos fondos permitirían acelerar el desarrollo de soluciones AgriPV adaptadas al contexto local. En este caso, las licitaciones específicas para tecnologías para el doble uso de la capacidad de suelo, podrían dar un impulso decisivo.

2.4.3.3. Sensibilización, promoción y difusión

Para maximizar la materialización de sistemas AgriPV, es esencial intensificar la sensibilización y educación, tanto de agricultores como de consultores de riego, así como de desarrolladores de proyectos ERNC. Esto se aplica a través de ferias, exposiciones y la colaboración con organizaciones, como el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y la Fundación para la Innovación Agraria. Además, se recomienda realizar entrevistas con tal de conocer el contexto social y operacional de los rubros, para así promocionar una política pública de sensibilización y educación de AgriPV entre sus posibles usuarios.

Capítulo 3

Caso de análisis de proyecto AgriPV existente y su respectivo análisis de costos

3.1. Introducción

En este capítulo se busca indagar en un proyecto AgriPV exitoso de mediana escala (entre 1 [MWp] a 4 [MWp]), **con el objetivo final de analizar la prefactibilidad de un sistema de estas características dentro del entorno chileno.** Para esto se analizará el diseño de dicho proyecto, el contexto en el cual está emplazado y las razones que motivaron su desarrollo. Además, se dimensionarán los costos del proyecto seleccionado, para posteriormente compararlos con costos de proyectos FV convencionales desarrollados en Chile (de 3 [MWp] aproximadamente). Cabe destacar que la comparación se realizará únicamente desde la perspectiva fotovoltaica, sin incluir costos relacionados con la agricultura, de manera que se enfoque en la visión de la empresa EPC (Engineering, Procurement and Construction) a cargo de la ingeniería, provisión y construcción del sistema AgriPV. Por último, se seleccionarán casos agrícolas representativos para Chile, en función de las regiones y sus productos representativos, con tal de entender el potencial de la tecnología AgriPV en general para el país.

En resumen, se plantean los objetivos a cumplir para realizar dicho análisis:

1. Analizar el diseño de un sistema AgriPV existente.

2. Estimar y comparar los costos del proyecto seleccionado con proyectos FV convencionales desarrollados en Chile.
3. Seleccionar casos agrícolas representativos para el AgriPV por región en Chile.

3.2. Metodología

3.2.1. Selección de proyecto AgriPV existente

En primer lugar, para la selección del proyecto se priorizarán:

- Sistemas AgriPV de mediana capacidad (entre 2 a 4 [MWp] de potencia). Esto debido a que se posee información confidencial acerca de proyectos FV convencionales desarrollados en Chile de 3 [MWp] de potencia aproximadamente, así la comparación no sufriría de efectos de escala.
- El uso de paneles semi-transparentes, debido a las numerosas ventajas que ofrece esta tecnología y sus sinergias.
- Proyectos cuyo cultivo se desarrolle en Chile de manera activa.

Luego, se realizará una tabla comparativa donde se seleccionará el proyecto más compatible según lo descrito anteriormente.

3.2.2. Análisis de diseño del proyecto seleccionado

Para realizar un análisis del diseño acerca del proyecto seleccionado, se plantea:

1. Definir los principales parámetros de diseño del sistema AgriPV.
2. Estimar parámetros de diseño para el proyecto seleccionado.
3. Analizar el diseño del proyecto: Extrapolar al contexto chileno.

3.2.2.1. Definir los principales parámetros de diseño de un sistema AgriPV

Los parámetros de diseño de un sistema AgriPV suelen definirse y guiarse según las necesidades del cultivo que se encuentre debajo. Para lograr definir los parámetros del

proyecto seleccionado se centrará el foco en la parte ingenieril FV, así se utiliza la Figura 3.1 como referencia clave.

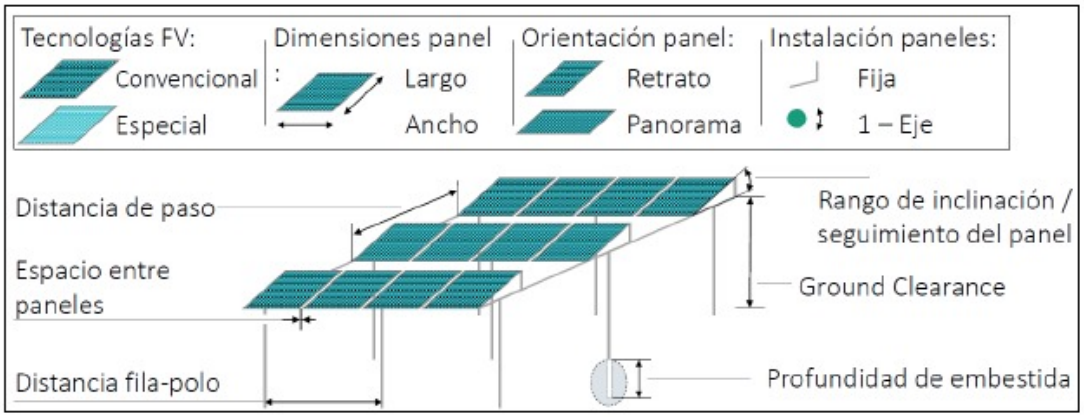


Figura 3.1: Principales parámetros ajustables para el diseño de un sistema AgriPV tipo aéreo. Cortesía de Fraunhofer Chile Research.

A partir de lo anterior se deben definir los siguientes parámetros:

1. Tecnologías de módulos FV: Se puede definir entre módulos convencionales o especiales.
2. Dimensiones de módulos FV.
3. Orientación de módulos FV: Pueden existir múltiples orientaciones dependiendo del diseño del sistema, generalmente hacia el norte o este/oeste (con o sin seguimiento para ambas).
4. Estructura de módulos FV y ángulo de inclinación: Existen disposiciones fijas para los módulos o estructuras con seguidores solares.
5. Distancia al suelo: Distancia máxima entre los módulos y el suelo.
6. Distancia de paso: Distancia entre filas de módulos.

3.2.2.2. Estimar parámetros de diseño para el proyecto seleccionado

Con el fin de estimar los parámetros definidos en el apartado anterior, y que no se encuentran definidos en la web por parte de la empresa constructora, se utilizarán distintas imágenes a encontrar en la web acerca del proyecto seleccionado. La idea consiste en estimar un parámetro de referencia y con dicho parámetro obtener las demás medidas.

Para realizar la estimación se utilizará el software Microsoft PowerPoint, ya que posee la herramienta de dibujo que posee lápices de dibujo, regla y ángulos.

Esta estimación se usará para entender si las dimensiones del sistema coinciden para una implementación en Chile, debido a que el método de cultivo puede variar según el país y las variedades cultivadas.

3.2.2.3. Análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV al contexto chileno

Ya habiendo estimado los parámetros de diseño para el proyecto seleccionado, se debe proceder a analizar el diseño en cuestión. El análisis se centrará en buscar implementar el proyecto en un contexto nacional favorable, entendiendo los pro y contra que pueda tener dentro de este nuevo contexto operacional.

A partir de lo anterior, se plantea la siguiente pregunta: ¿Dónde se podría implementar el proyecto seleccionado?

Teniendo en cuenta que se tratará de un sistema AgriPV, son parámetros de suma importancia la radiación solar local y las localidades chilenas en donde se desarrolle habitualmente el cultivo del proyecto seleccionado. A continuación, se describe un procedimiento para lograr entender y comparar cuantitativamente la diferencia entre la radiación solar en la que sitúa el proyecto seleccionado y las regiones chilenas en las que se desarrolla habitualmente el cultivo.

1. Se generará una lista con las regiones de Chile en las que se desarrolle el cultivo del proyecto AgriPV seleccionado. Se usarán fuentes procedentes de ODEPA-CIREN (Oficina de estudios y políticas agrarias y Centro de información de recursos naturales, respectivamente).
2. Se descargará un archivo Excel con parámetros relevantes característicos de las

provincias de cada región mediante Global Solar Atlas [20]. Los datos que se obtendrán por provincia son los siguientes según los nombres entregados por la página:

- Global horizontal irradiation: Irradiancia global horizontal en español (GHI).
- Specific photovoltaic power output: Potencia FV específica.

3. Se generarán tablas con la información proveniente de Global Solar Atlas por provincia y la localidad del proyecto seleccionado, así, se utilizará la Fórmula 3.1 para realizar la comparación entre los datos GHI o Potencia FV específica .

$$\%_{comparado} = \frac{|\text{Caso}_{\text{comparar}} - \text{Caso}_{\text{base}}|}{\text{Caso}_{\text{base}}} \times 100 \tag{3.1}$$

Donde:
$\%_{comparado}$: Corresponde al resultado de la comparación.
$\text{Caso}_{\text{comparar}}$: Corresponde al dato de la localidad chilena a comparar.
$\text{Caso}_{\text{base}}$: Corresponde al dato de localidad donde se encuentra el proyecto seleccionado.

Con dichas tabla comparativas, se podrá establecer una diferencia clara entre la localidad del proyecto seleccionado y las localidades donde se podría implementar dicho sistema AgriPV en Chile.

Luego, se plantea la siguiente pregunta: ¿Qué implicancias tendría implementar el proyecto AgriPV seleccionado, en las localidades/regiones chilenas donde habitualmente se desarrolla el cultivo del sistema AgriPV en cuestión?

Las consecuencias de la implementación de un sistema AgriPV están relacionadas con los rubros que esta tecnología abarca. Estos son: **El rubro solar y la agricultura.**

En el rubro solar, al variar la irradiancia según la localidad existen cambios en la magnitud de la producción eléctrica. Es por esto que se analizará dicha variación entre las regiones representativas del cultivo y la localidad del proyecto seleccionado.

Por parte del rubro agrícola, la implementación en un lugar distinto del mundo, conlleva a cambios de la realidad del cultivo. Esto puede suponer variaciones en los parámetros del sistema AgriPV, tales como: la distancia al suelo, transmitancia de módulos, etc. Es por esto que se analizará constructivamente qué cambios se le debe realizar al sistema

AgriPV según si el método de cultivación difiere del sistema original.

En resumen, se analizará el diseño AgriPV seleccionado procurando que este se pueda implementar en Chile, teniendo en cuenta posibles recomendaciones o cambios en los parámetros del sistema AgriPV debido al motivo de implementar en el contexto chileno.

3.2.3. Análisis de costos: proyecto AgriPV

Para el análisis de costos del proyecto seleccionado, se usará información de una empresa confidencial encargada de construir proyectos FV. Se compararán los costos de un sistema FV convencional con una estimación de costos AgriPV. Dicha estimación se realizará a partir de fuentes bibliográficas recientes que analicen ambos costos.

La información por parte de la empresa confidencial corresponde a cinco proyectos FV convencionales finalizados. Dicha información es clasificada, así que se trabaja para **crear una línea base de un proyecto FV convencional representativo (Base-PV) a partir de los proyectos reales**. Se realiza un perfil de costos en el que se detallan los siguientes parámetros en [USD/MWp]: mínimos, máximos, promedio, porcentaje del total (promedio), mediana, porcentaje del total (mediana) y la desviación estándar. Luego, se seleccionará la métrica estadística más representativa del perfil de costos entre las descritas anteriormente para así generar Base-PV.

La empresa confidencial trabaja con clasificaciones para sus costos, estas se presentan en la Tabla 3.1 y se mantendrán para clasificar los costos posteriormente.

Tabla 3.1: Clasificación de costos para proyectos FV convencionales con categorías y sub-categorías.

Categoría
Servicios de Ingeniería
Suministros & Equipamiento
Módulos FV
Subestructura (Trackers)
Inversor de corriente
Subestación
Monitoreo - SCADA
Cables de Poder & Acc.
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.
ESS & CCTV
Preparación del sitio
Cercado del sitio
Preparación del terreno
Trabajos de Construcción - Planta FV
Facilidades de sitio
Trabajos Civiles - Ext.
Trabajos Mecánicos - Ext.
Trabajos Eléctricos - Ext.
Trabajos de Interconexión - MV/HV
Trabajos de Línea de Conexión
Refuerzos eléctricos
Otros Costos de Proyecto
Total

Posteriormente, se realizará la estimación de costos de un proyecto AgriPV, donde se modificarán ciertas categorías de los costos de Base-PV de manera porcentual. Para una correcta estimación, se modifican los costos de las categorías y sub-categorías que tienen más posibilidad de variar entre un proyecto FV convencional y uno AgriPV. Entre estas se encuentran:

- Servicios de Ingeniería: Debido al sobre-costo que implica planificar el diseño de detalle de un sistema AgriPV versus uno convencional.
- Módulos FV: Debido a la posible diferencia de costos entre los paneles bifaciales usados en los proyectos convencionales versus la posibilidad de cambio por paneles semi-transparentes.
- Subestructura: Debido a que levantar los paneles a mayor altura generalmente implica mayor costo en la planificación y manufactura de la subestructura.

Se usarán fuentes de información externas para guiar la estimación descrita previamente y así formar una línea base para los costos de un sistema AgriPV (Base-APV).

Cabe destacar que la comparación se realizará **sólo desde un punto de vista FV sin incluir costos relacionados a la agricultura**, así, se puede realizar una comparación desde un punto de vista de la empresa EPC (Engineering, Procurement and Construction) que se encargaría de la ingeniería, proveer y construir el sistema AgriPV. Además, la idea de modificar los costos de servicios de ingeniería, módulos FV y subestructura va de la mano con su dominancia e incertidumbre dentro de la gestión de un proyecto FV común.

Con lo explicado hasta el momento, se puede realizar una comparación entre Base-PV y Base-APV. No obstante, al existir incertidumbre en la estimación de los valores de Base-APV, se decide realizar **cuatro casos** de análisis de sensibilidad para las categorías modificadas en Base-APV. De esta manera, **se generan casos de -25 %, -10 %, 10 % y 25 % de variación de los costos de las categorías modificadas durante la estimación**, esto con el objetivo de concluir posteriormente. La idea es que estos casos también se comparen con Base-PV para identificar el potencial beneficio o riesgo en un proyecto AgriPV versus un proyecto FV convencional. **Se pueden generar más análisis de sensibilidad conforme se requiera en los resultados.**

3.2.4. Selección de casos agrícolas representativos para el AgriPV en Chile

Además del análisis del proyecto, se realizará una selección de casos agrícolas representativos para la tecnología AgriPV en función de la geografía y de los productos representativos existentes en Chile. Para ello se plantearán primeramente los siguientes criterios de selección:

1. La geografía se interpretará como regiones, por lo que se seleccionarán productos representativos por región del país.

2. La tecnología AgriPV no posee un potencial determinante en todo el territorio nacional, si no más bien, en la zona centro-norte, centro y centro-sur del país. Bajo esas circunstancias se analizará desde la región de Coquimbo hasta la región de Los Lagos.

3. Por cada región se seleccionarán tres opciones relativas al rubro frutícola, siendo estas las que posean mayor superficie cultivada. Se filtra por el rubro frutícola

debido a que generalmente son cultivos permanentes, por lo que presentan alta viabilidad con el AgriPV. Dicha información se obtendrá a partir de los últimos catastros de superficie frutícola regional realizados por la ODEPA.

4. Posteriormente, se investigará de manera general acerca de la altura mínima, altura máxima y los requerimientos lumínicos de los resultados obtenidos anteriormente. Con esta información se realizará un filtro acerca de si es pertinente/viable implementar sistemas AgriPV con cada cultivo dentro de los resultados.

El filtro para entender si es viable implementar sistemas AgriPV en cada cultivo, tendrá que ver con:

- La altura usual de cultivo: La idea es que esta altura sea lo menor posible, de esta manera los costos de la subestructura se pueden aminorar, lo que beneficiaría a la rentabilidad del sistema AgriPV.
- El requerimiento lumínico de cultivo: El objetivo es que la demanda de luz no sea a pleno sol, con tal de que el cultivo pueda tolerar los paneles solares sin disminuir su rendimiento.

Luego, a partir de todo lo anterior, se puede lograr seleccionar casos agrícolas representativos para el AgriPV por región. Además, se realizará una tabla jerarquizada según mayor superficie total cultivada de frutícolas representativos en Chile, para entender a nivel país que especies son las más cultivadas y así entender el potencial nacional de la implementación AgriPV en alguno de estos cultivos.

3.3. Resultados

3.3.1. Selección de proyecto AgriPV existente

Se seleccionan los siguientes proyectos AgriPV en función de la metodología y se crea la siguiente tabla comparativa con características de dichos proyectos.

Tabla 3.2: Proyectos AgriPV seleccionados.

Nombre del proyecto:	**Piet Albers**	**Amance**	**Le domaine de Nidolères**	**Monticelli D'ongina**
Capacidad [MWp]:	2,7	2,4	2,1	3,2
Módulos [Qty]:	10.250	5.500	No info	11.535
Especificación de Módulos:	Semi-Transparente - Bifacial	Opaco - Bifacial	Opaco - Bifacial	Opaco - Bifacial
Área de sitio [ha]:	3,2	5	4,5	23,8
Desarrollador:	Groenleven	TSE-Energy	SunAgri	REM Tec Energy
País:	Países Bajos	Francia	Francia	Italia
Cultivo(s):	Frambuesa	Soja, trigo, cebada de invierno, etc.	Cepas de uva: Grenache blanc, Chardonnay et Marselan	Soja y trigo

A partir de la información presente en la Tabla 3.2, se selecciona el proyecto **Piet Albers** al ser el proyecto que mejor reúne tanto los criterios de capacidad (aproximadamente 3 [MWp]), módulos FV (semi-transparentes) y cultivo que se desarrolla de manera activa en Chile (frambuesas).

El desarrollo de este proyecto contó con un estudio liderado por la universidad de Wageningen, el cual obtuvo el rendimiento del cultivo frambuesa bajo los paneles y bajo las mallas convencionales de protección. Dentro de los resultados se obtuvo que el uso de paneles solares sólo tiene un efecto menor en el rendimiento, disminuyéndolo en 5 % comparado con el cultivo bajo las mallas convencionales de protección [72]. A partir de estos resultados, parece posible una mayor optimización si se adelanta el momento de la plantación, de modo que el cultivo crezca en el periodo de mayor luminosidad de la temporada [72].

3.3.2. Estimar parámetros de diseño: proyecto Piet Albers

Para realizar el análisis de diseño del proyecto seleccionado, en primer lugar, se estima una altura de referencia para así poder obtener las medidas aproximadas de los parámetros del sistema AgriPV.

Para obtener dicha altura de referencia se utiliza la siguiente imagen, donde se estima la altura de la persona en 1,90 [m], aterrizando dicha medida en el sistema tal como se puede observar en la Figura 3.2. De esta forma, se establece la altura de la segunda madera (contando desde arriba hacia abajo) como 1,90 [m] y por ende, se pueden estimar los parámetros con otras imágenes.



Figura 3.2: Imagen utilizada para obtener una referencia de altura hacia el sistema [11].

Tecnologías de módulos FV

Los módulos pertenecientes al proyecto presentan tecnología semi-transparente (Figura 3.3), provocando un promedio de transmitancia de luz del 56 % en las hojas de los cultivos de frambuesa [73].



Figura 3.3: Frambueso creciendo debajo de paneles semi-transparentes en proyecto Piet Albers [12].

Dimensiones de módulos FV

Las dimensiones de los paneles se estimaron con imágenes, donde se pudo obtener las siguientes medidas.

- Largo: 2,65 [m]
- Ancho: 1,30 [m]

En las Figuras 3.4 y 3.5 se puede observar las dimensiones estimadas en los módulos.

Orientación de módulos FV

En general y dependiendo del hemisferio, los módulos FV suelen orientarse hacia el sur en el hemisferio norte y hacia el norte en el hemisferio sur. En el caso de este proyecto,



Figura 3.4: Largo estimado del módulo semi-transparente utilizado en proyecto Piet Albers [13].

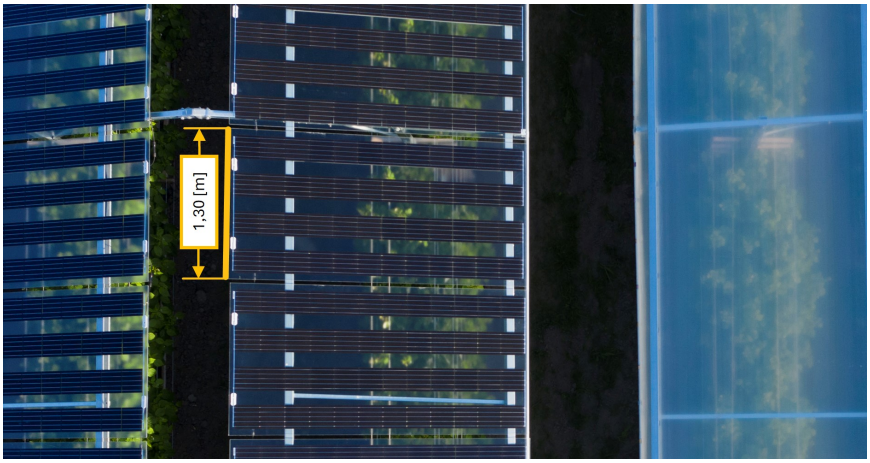


Figura 3.5: Ancho estimado del módulo semi-transparente utilizado en proyecto Piet Albers [12].

los paneles se orientan en función de la subestructura en forma de techo, donde una fila de paneles apunta al este y la otra al oeste. La idea de esta disposición es generar energía durante las mañanas y las tardes principalmente, aprovechar el agujero que se genera en el centro del sistema de módulos para favorecer la ventilación del cultivo y para protegerlo en caso de climas de precipitaciones/granizo.

Estructura de módulos FV

La estructura que sostiene a los módulos es fija, por lo que los paneles no presentan movilidad. Además, el ángulo de inclinación de los módulos es de 15° (alpha) presente en la Figura 3.8.



Figura 3.6: Proyecto Piet Albers finalizando su fase de construcción [14].



Figura 3.7: Estructura AgriPV de proyecto Piet Albers durante su fase de construcción [13].

Se puede observar en la Figura 3.7 que se presentan varillas de madera acopladas a la estructura AgriPV, donde según lo investigado, dichas varillas se usan para guiar la altura del cultivo de los frambuesos. Se puede observar la instalación del sistema de riego durante esta etapa de construcción también.



Figura 3.8: Ángulo de inclinación estimado [12].

Distancia al suelo

Se estima la distancia al suelo en la Figura 3.9.

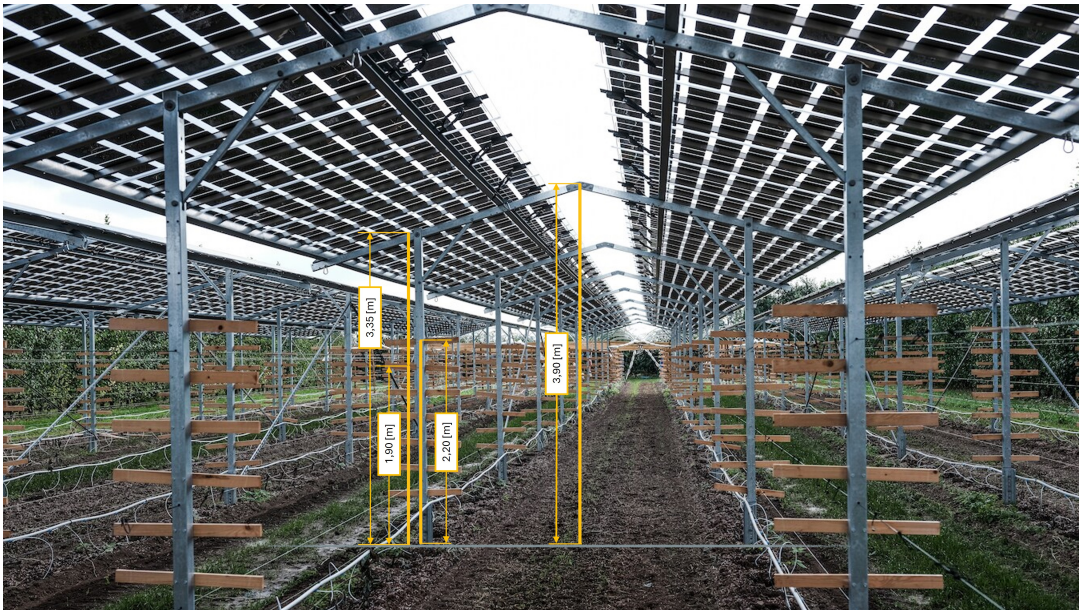


Figura 3.9: Distancias estimadas al suelo desde distintos puntos de referencia [13].

La Figura 3.10 indica alturas de referencia que indican parámetros constructivos. En resumen:

- Altura máxima del cultivo de frambuesas: 2,20 [m]
- Altura de viga de sistema AgriPV: 3,35 [m]
- Altura máxima del sistema AgriPV (Distancia al suelo): 3,90 [m]



Figura 3.10: Distancias estimadas de parámetros constructivos de interés general [13].

- Largo del soporte que fija el módulo FV: 3,00 [m]
- Largo del módulo FV: 2,65 [m]
- Ancho máximo del sistema AgriPV: 6,00 [m]

Distancia de paso

En este proyecto, existen dos maneras de interpretar la distancia de paso:

1. La distancia entre cada fila de módulos pertenecientes al conjunto de paneles (Dentro de la estructura AgriPV).
2. La distancia entre cada conjunto de paneles que se encuentran ligados la estructura principal (Fuera de la estructura AgriPV).

A continuación se presenta la Figura 3.11 que representa el caso 1) y la Figura 3.12 que representa el caso 2, cuantificando así ambas interpretaciones de *distancia de paso*.

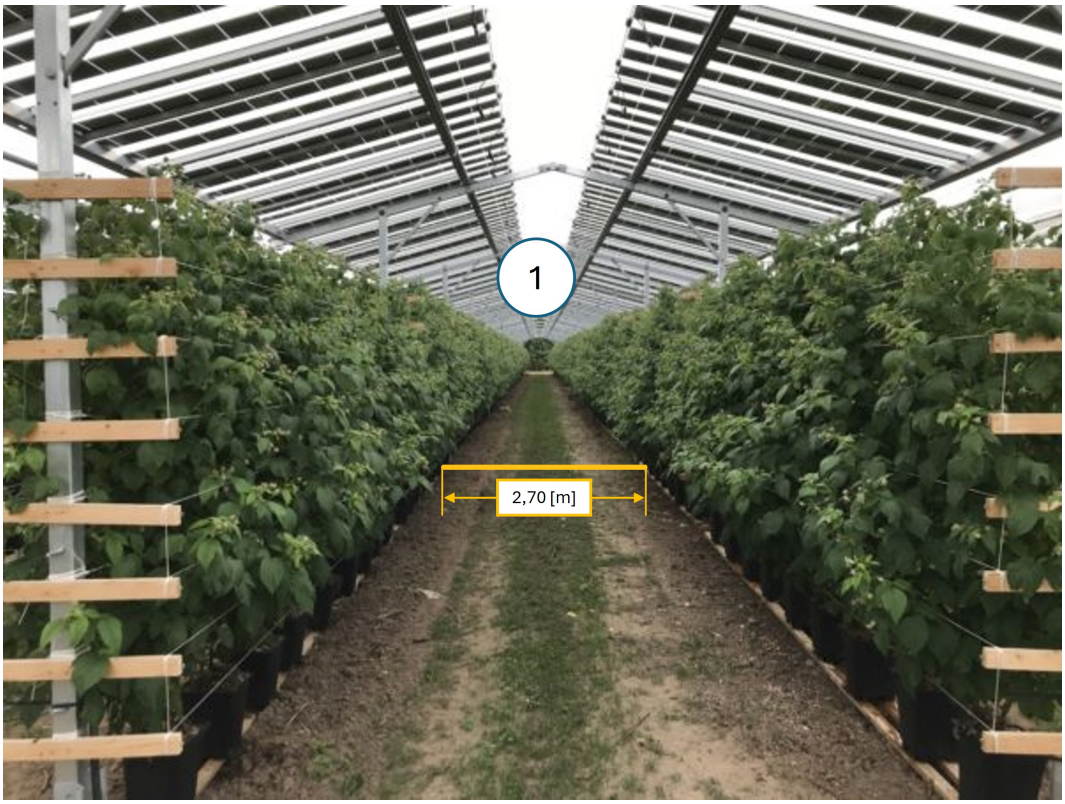


Figura 3.11: Distancia de paso estimada representada en el sistema (Dentro de la estructura AgriPV) [15].

Las distancias son:

1. Distancia de paso (Dentro de la estructura AgriPV): 2,70 [m]
2. Distancia de paso (Fuera de la estructura AgriPV): 1,10 [m]



Figura 3.12: Distancia de paso estimada representada en el sistema (Fuera de la estructura AgriPV) [16].

3.3.3. Análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV Piet Albers a la realidad chilena

Para hacer un análisis de diseño del proyecto Piet Albers, se deben tomar en cuenta los criterios principales que guían el diseño de un sistema AgriPV, siendo estos parámetros de cultivo, en este caso frambuesas, y parámetros relativos a la FV, es decir, la ubicación del sistema y cantidad de irradiación de la zona. Además, como la idea del análisis, es extrapolar el sistema al contexto chileno, se plantea la pregunta:

¿Dónde se podría implementar el proyecto Piet Albers?

Es así que se recoge, en primer lugar, información respectiva a la superficie que abarca el cultivo de frambuesas por región (Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Superficie de cultivo de frambuesas por región según los últimos catastros de superficie frutícola regional.

Región	Superficie [ha]	Año de catastro
Coquimbo	0,95	2024
Valparaíso	1,84	2023
Metropolitana	1,05	2023
O'Higgins	67,59	2024
Maule	558,16	2022
Ñuble	1099,51	2022
Biobío	31,45	2022
La Araucanía	149,81	2022
Los Ríos	121,88	2022
Los Lagos	30,40	2022

A partir de la información presente en la Tabla 3.3, se seleccionan las tres regiones con más hectáreas cultivadas de frambuesas, catalogándose como **regiones representativas del cultivo de frambuesa**. Estas son:

1. Ñuble.
2. Maule.
3. La Araucanía.

Luego, se tiene como objetivo de comparar el potencial FV de las localidades chilenas con Babberich, Países Bajos. Dentro de los datos presentes en la Tabla 3.4 se puede usar la Irradiancia GHI para comparar el potencial FV, sin embargo, la fuente de información (Global Solar Atlas) tiene como piedra angular de su estudio la evaluación del potencial FV mediante la **Potencia FV específica** que considera parámetros que afectan el rendimiento de un sistema FV [74]. Con esto en mente se compara mediante la utilización de la Fórmula 3.1 para el dato de Potencia FV específica teniendo la localidad de Babberich, Países Bajos como caso base, mientras que las localidades chilenas son los casos que varían.

Tabla 3.4: Datos específicos FV del proyecto Piet Albers y de las regiones representativas del cultivo de frambuesa. Se incluye comparación porcentual de la Potencia FV específica por localidad, tomando a Babberich, Países Bajos como referencia. Datos obtenidos mediante Global Solar Atlas [20].

País	Región	Localidad	Irradiancia GHI [kWh/m2-año]	Potencia FV específica [kWh/kWp-año]	Comparativa de Potencia FV específica
NL	Gelderland	Babberich	1062,5	1062,7	0 %
CL	Maule	Linares	1825,4	1638,9	54 %
CL	Maule	Talca	1835,5	1620,5	52 %
CL	Maule	Curicó	1827,7	1603,1	51 %
CL	Ñuble	Diguillín	1796,9	1626,8	53 %
CL	Ñuble	Punilla	1815,6	1636,5	54 %
CL	La Araucanía	Cautín	1526,9	1418,9	34 %
CL	La Araucanía	Malleco	1617,9	1493,2	41 %

Ya habiendo abarcado lo relativo a FV, se ahondará en los parámetros del cultivo de frambuesas dentro del contexto chileno, particularmente en las regiones representativas de dicho cultivo.

3.3.3.1. Parámetros de cultivo del frambueso en Chile

En el caso de esta investigación, es relevante entender como repercute la manera en que se desarrolla el cultivo del frambueso en Chile en el diseño de un sistema AgriPV. Si bien el proyecto seleccionado (Piet Albers - Babberich, Países Bajos) presenta un sistema diseñado para frambuesas, al extrapolar el caso a Chile, es sumamente importante entender que el diseño del proyecto Piet Albers está pensado para el clima de Babberich, Países Bajos y que una hipotética implementación en Chile implica adaptar dicho diseño a los problemas locales del cultivo. En resumen, al tomar un diseño ya existente e implementarlo en otra zona con un clima diferente, deben existir modificaciones que garanticen beneficios por parte del sistema AgriPV para el cultivo en el clima local.

Con esto en mente:

1. Se investigará acerca de aspectos generales, climáticos y de suelo del frambueso, para entender como estos repercuten en el diseño AgriPV.
2. Se recomendarán cambios en el sistema AgriPV o parámetros a tener en cuenta para garantizar la protección frente a climas adversos locales, tales como:
    - Calor extremo.
    - Radiación.
    - Precipitación y granizo.

Aspectos del cultivo del frambueso

La frambuesa (Rubus idaeus L.), es un arbusto perenne de la familia de las Rosáceas, caracterizada por tener raíces que se desarrollan principalmente de manera horizontal y que poseen la capacidad de emitir brotes. Se distinguen dos tipos fenológicos principales en la especie: las frambuesas remontantes, que producen dos cosechas anuales (desde fines de noviembre a inicios de enero y de febrero a mayo), y las no remontantes, cuya fructificación ocurre una sola vez al año, entre fines de noviembre y enero [75].

El frambueso es una especie altamente adaptable a diversas condiciones climáticas. En Chile, su cultivo se extiende principalmente desde la Región de O´Higgins hasta la Región de Los Lagos requiriendo entre 750 y 1.700 horas de frío invernal, dependiendo de la variedad, y necesita una estación calurosa corta para la maduración de sus frutos. Tolera bien los fríos invernales, aunque las heladas primaverales pueden dañar la base de las yemas florales, reduciendo la producción sin eliminarla completamente debido a su fructificación escalonada. En variedades remontantes, la producción otoñal puede verse afectada por las lluvias durante la maduración, ya que el exceso de humedad altera la firmeza y el sabor del fruto [76].

En las estaciones más calurosas, si bien las altas temperaturas estivales no afectan directamente la producción si el riego es adecuado, pueden acelerar la maduración y ablandar los frutos, reduciendo su calidad comercial. Finalmente, la sequía es el factor más limitante, ya que reduce la producción de materia seca, afecta la fotosíntesis, ralentiza el crecimiento de la planta y los frutos, además de modificar su fenología, con efectos que varían según la variedad y la disponibilidad hídrica [76].

Para el cultivo del frambueso en Chile se distinguen los siguientes parámetros:

- Altura del cultivo: entre 1,7 a 2 metros aproximadamente.
- Requerimiento lumínico: alta luminosidad.
- Temperatura mínima de crecimiento: 10 [°C].
- Rango de temperatura óptima de crecimiento: 18-24 [°C].
- Límite máximo de temperatura de crecimiento: 28-32 [°C].
- Requerimiento de horas frío (T°<7°): 750-1.700 [h].
- Profundidad de suelo: 1 [m].

En la Figura 3.13 se puede observar la disposición en filas para el cultivo del frambueso, así como las distancias usadas para el cultivo de frambuesa en Chile.



Figura 3.13: Marco general de plantación de frambueso en Chile, créditos a Marina Gambardella y a INDAP [17].

3.3.4. Análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers

Para realizar el análisis de costos del proyecto seleccionado, se sigue el procedimiento planteado en la metodología. En este procedimiento se extrae información acerca de cinco proyectos reales de FV convencional de aproximadamente 3 [MWp] de potencia. A partir de la información confidencial, se realiza un perfil de costos que posee categorías y sub-categorías de dichos costos, además de distintas métricas estadísticas reflejadas en la Tabla B.1. En dicho perfil de costos, se decide usar la métrica estadística *Mediana*, debido a que corresponde a un valor más representativo que el *Promedio*, generando así la Tabla 3.5, que corresponde a la base representativa de costos para los proyectos FV convencionales, nombrada de ahora en adelante como *Base-PV*.

Tabla 3.5: Base de costos representativos para los proyectos FV convencionales (Base-PV) con su respectivo porcentaje del total.

Categoría	Costo Base [USD/MWp]	Porcentaje del total
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**1 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**57 %**
Módulos FV	222.878	27 %
Subestructura (Trackers)	106.548	13 %
Inversor de corriente	24.367	3 %
Subestación	41.503	5 %
Monitoreo - SCADA	15.987	2 %
Cables de Poder & Acc.	32.270	4 %
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	1 %
ESS & CCTV	16.243	2 %
Preparación del sitio	**13.555**	**2 %**
Cercado del sitio	11.795	1 %
Preparación del terreno - Externo	1.760	0 %
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**26 %**
Facilidades de sitio	12.606	2 %
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	1 %
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	23 %
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	1 %
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**8 %**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	3 %
Refuerzos eléctricos	39.316	5 %
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**6 %**
Total	**816.091**	**100 %**

A continuación, a partir de Base-PV se realiza una estimación de los costos del proyecto AgriPV Piet Albers. Para esto se usarán cotizaciones de los años 2021/2022, años similares a los proyectos de Base-PV, para aproximar los costos de las categorías

mencionadas en la metodología, siendo estas:

- Servicios de Ingeniería.
- Módulos FV.
- Subestructura.

Para concretar la estimación, se variará Base-PV mediante porcentajes, de tal forma que responda a las cotizaciones mencionadas [77], obteniendo la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Base-PV y Base-APV con su porcentaje de aumento a partir de Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	Base-APV [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.078**	**100 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**758.651**	**62 %**
Módulos FV	222.878	312.029	40 %
Subestructura (Trackers)	106.548	308.988	190 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-
Cables de Poder & Acc.	32.270	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**1.112.222**	**36 %**

A partir de la Tabla 3.6 se puede desprender que existe un aumento de costos entre Base-PV y Base-APV. Esto se debe principalmente a los *Módulos FV* y la *Subestructura* con un aumento del 40 % y 190 % respectivamente.

Análisis de sensibilidad para Base-APV

Al realizar una estimación existe una incertidumbre asociada. Para este caso, existe incertidumbre en:

- Los datos mediante los que se construyó Base-PV.
- Las variaciones mediante las que se estimó Base-APV.

Es por esto que, de acuerdo a la metodología se generan cuatro casos de sensibilidad en los que se variará en -25 %, -10 %, 10 % hasta 25 % la estimación de Base-APV, dichas variaciones se llamarán VAR(*-25 %), VAR(*-10 %), VAR(*10 %) y VAR(*25 %) respectivamente.

Tabla 3.7: Casos de variación en la estimación de Base-APV en un -25 % (VAR(*-25 %)) y -10 % (VAR(*-10 %)), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR(*-25 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR(*-10 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**6.809**	**50 %**	**8.170**	**80 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**603.397**	**29 %**	**696.549**	**49 %**
Módulos FV	222.878	234.022	5 %	280.826	26 %
Subestructura (Trackers)	106.548	231.741	118 %	278.089	161 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**954.698**	**17 %**	**1.049.212**	**29 %**

En la Tabla 3.7 se presentan resultados para los intervalos más optimistas. En el caso VAR*(-25 %) se puede observar que a pesar de disminuir las estimaciones de Base-APV en -25 %, sigue existiendo un aumento en los costos de un 17 % (Respecto a Base-PV), el aumento se da principalmente por la diferencia de costos en la subestructura.

El caso de VAR*(-10 %), existe un aumento de costos del 29 %. Este aumento se da en primer lugar, por los costos de la subestructura y en segundo lugar, por los costos de los

módulos FV.

Tabla 3.8: Casos de variación en la estimación de Base-APV en un 10 % (VAR(*10 %) y 25 % (VAR(*25 %), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR(*10 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR(*25 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.986**	**120 %**	**11.348**	**150 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**820.753**	**76 %**	**913.905**	**96 %**
Módulos FV	222.878	343.232	54 %	390.036	75 %
Subestructura (Trackers)	106.548	339.887	219 %	386.235	263 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**1.175.231**	**44 %**	**1.269.745**	**56 %**

En la Tabla 3.8 se presentan resultados para los intervalos más pesimistas. En el caso VAR*(10 %) se puede observar que existe un aumento en los costos de un 44 %. Para caso de VAR*(25 %), existe un aumento de costos del 56 %. Ambos aumentos se dan en primer lugar, por los costos de la Subestructura y en segundo lugar, por los costos de los Módulos FV.

A partir de los resultados presentados, se observa un constante aumento de costos en las estimaciones a partir de los costos de la subestructura, seguido posteriormente por los módulos FV. Con esto en mente, se desarrollan dos nuevos casos de análisis de sensibilidad donde a la estimación Base-APV se le modifique sólo el ítem de subestructura, asumiendo que este costo pudiese ser menor. Estos casos se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Casos de variación en la estimación de Base-APV, sólo modificando la Subestructura en un 50 % (VAR(Substr.*50 %) y 100 % (VAR(Substr.*100 %)) de aumento respecto a Base-PV; todo esto con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR (Substr.*50 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR (Substr.*100 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.078**	**100 %**	**9.078**	**100 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**609.485**	**30 %**	**662.758**	**42 %**
Módulos FV	222.878	312.029	40 %	312.029	40 %
Subestructura (Trackers)	106.548	159.821	50 %	213.095	100 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**963.055**	**18 %**	**1.016.329**	**25 %**

En la Tabla 3.9 se observan casos más optimistas de costos al aumentar en un 50 % y 100 % el precio asociado a la subestructura y manteniendo el resto en la estimación realizada como Base-APV.

Estos nuevos casos de análisis de sensibilidad permiten apreciar el peso del aumento en el costo de la subestructura realizado en la estimación Base-APV. Se puede apreciar en la Tabla 3.9 que al aumentar un 50 % los costos de la subestructura, los costos totales de un sistema AgriPV resultan un 18 % mayores que Base-PV. Así mismo, al aumentar un 100 % los costos de la subestructura, los costos totales de un sistema AgriPV se pueden estimar un 25 % mayores que Base-PV.

3.3.5. Selección de casos agrícolas representativos para el AgriPV en Chile

Además del proyecto analizado, se busca realizar una selección de casos agrícolas representativos para la tecnología AgriPV. Para ello se sigue lo mencionado en la metodología y se realiza la Tabla 3.10 que contiene información acerca de los tres cultivos frutícolas por región que poseen más superficie cultivada.

Tabla 3.10: Cultivos frutícolas representativos por región según mayor superficie cultivada según último catastros de superficie frutícola para cada región [21].

Región de Chile	Jerarquía	Cultivo frutícola representativo	Superficie cultivada [ha] [21]
Coquimbo	1	Mandarino	5.240
Coquimbo	2	Vid de Mesa	5.153
Coquimbo	3	Olivo	3.187
Valparaíso	1	Palto	20.434
Valparaíso	2	Vid de Mesa	8.413
Valparaíso	3	Nogal	6.307
Metropolitana	1	Nogal	15.522
Metropolitana	2	Cerezo	5.430
Metropolitana	3	Vid de Mesa	5.310
O'Higgins	1	Cerezo	29.935
O'Higgins	2	Ciruelo Europeo	9.700
O'Higgins	3	Vid de Mesa	8.918
Maule	1	Cerezo	27.818
Maule	2	Avellano	16.956
Maule	3	Manzano Rojo	15.461
Ñuble	1	Avellano	6.559
Ñuble	2	Arándano Americano	4.143
Ñuble	3	Cerezo	2.973
Biobío	1	Arándano Americano	1.768
Biobío	2	Nogal	1.543
Biobío	3	Avellano	1.214
La Araucanía	1	Avellano	8.438
La Araucanía	2	Manzano Rojo	2.675
La Araucanía	3	Arándano Americano	1.899
Los Ríos	1	Arándano Americano	1.802
Los Ríos	2	Avellano	1.752
Los Ríos	3	Cranberry	683
Los Lagos	1	Avellano	1.412
Los Lagos	2	Arándano Americano	1.021
Los Lagos	3	Cerezo	803

Luego, a partir de investigación general de cada cultivo presente en la Tabla 3.10, se obtiene altura mínima, altura máxima y los requerimientos lumínicos para cada especie, esta información se encuentra en la Tabla 3.11. La idea es que con la información de cada cultivo se puede hacer una selección de cultivos aptos para el AgriPV, lo cual se hace posterior a la información de la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Generalidades de interés de cultivos frutícolas más representativos de Chile (Entre la región de Coquimbo y Los Lagos): Superficie total cultivada, rango de altura y requerimiento lumínico.

Cultivo	Superficie total cultivada [ha] [21]	Porcentaje de la superficie total cultivada de frutales [%]	Altura mínima [m]	Altura máxima [m]	Requerimiento lumínico
Cerezo [78]	66.958	18 %	2	9	Alto
Avellano [79]	36.330	10 %	2	5	Medio - Alto
Vid de Mesa [80]	27.793	8 %	2	3	Alto
Nogal [81]	23.372	6 %	6	8	Alto
Palto [82]	20.434	6 %	2	15	Alto
Manzano Rojo [83]	18.136	5 %	2	10	Alto
Arándano Americano [84]	10.632	3 %	2	2.5	Medio - Alto
Ciruelo Europeo [85]	9.700	3 %	2	6	Medio - Alto
Mandarino [86]	5.240	1 %	3	5	Pleno sol
Olivo [87]	3.187	1 %	4	6	Pleno sol
Cranberry [88]	683	0 %	-	<0,5	Alto
Total de cultivos frutícolas	**363.784**	**100 %**	**-**	**-**	**-**

1) **Cerezo:** El cerezo posee altura variable [78] y disposiciones de cultivo que permiten la sinergia con AgriPV. Además su requerimiento lumínico depende de la variedad cultivada [78]. Se considera un candidato potencial para un diseño AgriPV teniendo en cuenta su gran superficie de extensión.

2) **Avellano:** Tradicionalmente el cultivo del avellano puede alcanzar 5 metros. Sin embargo, en huertos modernos existe la posibilidad de un manejo a menores

alturas [79] lo que permite un mejor acople con la tecnología AgriPV. Se considera un candidato con potencial en huertos con un manejo a menor altura.

3) **Vid de Mesa:** En Francia ya hay experiencias con viñedos bajo sistemas agrivoltaicos, donde una cobertura parcial protege de granizo y sol excesivo **fuente**. Para la vid de mesa, un diseño que limite sólo el sol extremo puede prevenir quemaduras y deshidratación en el fruto. Sin embargo, hay que adaptar el sistema de conducción y asegurar que la uva reciba la radiación necesaria para su correcto desarrollo. Se considera un candidato factible para ciertas variedades que toleren mejor la sombra.

4) **Nogal:** Los nogales pueden superar fácilmente los 6 metros [81]. No resulta viable la instalación de AgriPV, principalmente debido a la altura.

5) **Palto:** El palto alcanza alturas de 4 a 6 metros y más [82], además de poseer una alta necesidad de luz, por lo que no se considera factible implementar AgriPV en condiciones normales de cultivo.

6) **Manzano Rojo:** En huertos modernos, el manzano puede manejarse a alturas de 2 a 3 metros [83] (sistema de muro frutal, por ejemplo), facilitando la colocación de paneles. Además, un ligero sombreado podría prevenir golpe de sol. De esta manera la implementación de AgriPV es puede ser factible siempre y cuando se respeten las necesidades del cultivo.

7) **Arándano Americano:** Es un arbusto de baja estatura (generalmente no más de 2 metros) y en zonas de alta radiación puede incluso beneficiarse de algo de sombra para reducir estrés térmico [84]. Así se considera un gran candidato para el uso con la tecnología AgriPV.

8) **Ciruelo Europeo:** El ciruelo europeo posee altura variable [85], así mismo como su demanda al sol. Se considera un candidato potencial para un diseño AgriPV dependiendo del mercado que este cultivo posea.

9) **Mandarino:** El mandarino requiere bastante sol para satisfacer sus necesidades [86] y su altura puede jugar en contra para el diseño de un sistema AgriPV. Podría considerarse en zonas de radiación muy intensa, con un diseño cuidadoso que minimice sombra excesiva.

10) **Olivo:** En sistemas tradicionales, el olivo se desarrolla a alturas superiores a 5-6

metros [87], lo que dificulta notablemente su implementación. Se considera no factible para AgriPV.

11) **Cranberry:** El cranberry (arándano rojo americano) es un cultivo de muy baja altura, el cual se maneja dentro de agua [88]. No se recomienda la implementación de AgriPV debido a la dificultad de coincidir el método de cultivo con el diseño AgriPV.

Tabla 3.12: Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV, con su respectiva superficie cultivada en la región.

Región	Cultivo frutícola representativo	Superficie cultivada del cultivo en la región [ha] [21]
Coquimbo	Mandarino	5.240
Valparaíso	Vid de Mesa	8.413
Metropolitana	Cerezo	5.430
O´Higgins	Cerezo	29.935
Maule	Cerezo	27.818
Ñuble	Avellano	6.559
Biobío	Arándano Americano	1.768
La Araucanía	Avellano	8.438
Los Ríos	Arándano Americano	1.802
Los Lagos	Avellano	1.412

De esta manera, se genera la Tabla 3.12 que resume casos agrícolas representativos en Chile en función de las regiones potenciales para AgriPV. La selección considera las regiones de Coquimbo hasta Los Lagos, y los principales candidatos del rubro frutícola según su viabilidad con AgriPV (altura y requerimiento lumínico), así como según la mayor cantidad de superficie cultivada.

3.4. Discusión y conclusiones

3.4.1. Discusión de análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV Piet Albers a la realidad chilena

Al momento de analizar el diseño y extrapolar a Chile el sistema AgriPV Piet Albers, se debe tener en cuenta el rol que cumple un sistema AgriPV para la generación de energía eléctrica y para la agricultura.

Respecto a la generación eléctrica, el proyecto Piet Albers se encuentra originalmente en Babberich, Países Bajos; donde existe una irradiación GHI menor comparado con las localidades representativas para el cultivo de frambuesa en Chile. Con los resultados presentes en la Tabla 3.4 se establece que **en cada localidad representativa del cultivo de frambuesas de Chile se podría generar más energía eléctrica que en Babberich, Países Bajos**. El rango varía desde un 34 % más de generación eléctrica en Cautín, La Araucanía hasta un 54 % más de generación en las localidades de Punilla y Linares, ubicadas en las regiones del Ñuble y Maule respectivamente.

Cabe destacar que no se consideran factores climáticos que afecten la eficiencia de la FV más que los considerados según Global Solar Atlas (sitio que provee la información de irradiación) para entender el potencial FV. Así, en un análisis de un caso real, se recomienda considerar la nubosidad de cada zona y usar información del *Explorador solar* [29] dispuesto por el Ministerio de Energía de Chile, que en este caso no se usó debido a la dificultad en el manejo de datos. Además, se debe considerar que la disposición en la que se plantea el sistema Piet Albers es este-oeste, lo cual afecta notablemente en como, cuando y cuánto se genera la energía eléctrica, lo que implica un análisis más profundo.

El desarrollo de este proyecto contó con un estudio liderado por la universidad de Wageningen, el cual obtuvo el rendimiento del cultivo frambuesa bajo los paneles y bajo las mallas convencionales de protección. Dentro de los resultados se obtuvo que el uso de paneles solares sólo tiene un efecto menor en el rendimiento, disminuyéndolo en 5 % comparado con el cultivo bajo las mallas convencionales de protección [72]. A partir de estos resultados, parece posible una mayor optimización si se adelanta el momento de la plantación, de modo que el cultivo crezca en el periodo de mayor luminosidad de

la temporada [72].

En lo que respecta a la agricultura de este sistema AgriPV y a los aspectos del cultivo de frambuesa en Chile, se puede desprender que existen ciertos parámetros del frambueso que no varían en demasía comparado con Babberich, Países Bajos. La distribución espacial del cultivo es similar, lo que se puede observar comparando la Figura 3.11 y la Figura 3.13. Con esto en mente, si tomamos en cuenta que en el proyecto Piet Albers hubo un rendimiento agrícola un 5 % menor debajo de los paneles FV comparado con el cultivo bajo las mallas convencionales de protección [72], se puede deducir que con una mayor radiación solar, presente en las regiones chilenas analizadas, existirá otro resultado de rendimiento agrícola, el cual incluso podría ser mayor debido a un entorno más seco. De este modo, al momento de extrapolar el proyecto al entorno chileno, se deben considerar los problemas a solucionar y como el sistema AgriPV sería un beneficio en el contexto chileno.

Para las altas temperaturas de verano, es sumamente relevante que el cultivo posea buena ventilación [11], para lo cual se debe garantizar que el agujero existente entre paneles permita la convección natural del aire de manera oportuna. Es así que se recomienda **aumentar la distancia de paso estimada dentro de la estructura FV**, de esta manera el agujero existente entre los paneles será más grande y así se garantizará una mejor ventilación del cultivo. Además, se recomienda **analizar la transmitancia de los paneles semi-transparentes** con el fin de que estos puedan ser usados para reemplazar las mallas de sombras en los cultivos. En el mejor de los casos, se puede disminuir la transmitancia de los módulos y así proteger en mayor manera al cultivo de la excesiva radiación solar, mientras que existe la posibilidad de generar mayor energía eléctrica.

En cuanto a las bajas temperaturas, estas traen fenómenos tales como el granizo y las precipitaciones las cuales pueden afectar la cosecha de otoño en variedades remontantes. Es por esto que se hace hincapié en **mantener los paneles con su funcionalidad de techo para que de esta manera puedan proteger al cultivo de las precipitaciones otoñales**. Otro fenómeno asociado a las bajas temperaturas son las heladas, donde el sistema puede generar una leve resiliencia manteniendo más constantes las temperaturas. No obstante, esto no suele representar una solución definitiva para estos problemas ya que los sistemas AgriPV amortiguan aproximadamente entre 1-2 [°C], por lo que se recomienda un sistema anexo que lidie con las heladas. Respecto a las horas frío que

debe adquirir la planta en invierno, es de suma importancia que el diseño AgriPV no impida al cultivo de adquirir dichas temperaturas (T°<7°), algo que debe ser crucial para que el sistema no represente efectos negativos a la hora de generar un ambiente más controlado para el frambueso.

Por último, la distribución y el modo de cultivo se debe considerar en el diseño AgriPV y en Chile. A diferencia con el proyecto Piet Albers, se suele realizar la plantación directamente en tierra (Piet Albers usa macetas para cada frambueso). A partir de esto, **se recomienda usar macetas que coincidan con la construcción**, donde estas pueden ser macetas individuales o grupales. Si no, se recomienda que el diseño AgriPV se adapte al desarrollo del cultivo en Chile, lo que supone que las vigas de la subestructura AgriPV no interfieran con la compactación de la tierra y los camellones en los que se distribuye el cultivo. Además, se recomienda **hacer uso de las vigas del sistema AgriPV para hacer el sistema de sujeción del frambueso**, tal cual como en el proyecto original. Cabe destacar que es vital el uso de subestructura específica, así como el uso de paneles semi-transparentes para habilitar los beneficios agrícolas anteriormente mencionados.

3.4.2. Discusión de análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers

Dentro de los resultados del análisis de costos, existe constante incertidumbre acerca de los datos trabajados. Por un lado, sólo existen datos de costos FV convencionales relacionados a una sola empresa, lo cual puede no ser representativo para el totalidad de empresas que construyen proyectos FV. Por otro lado, para construir la estimación de costos AgriPV se modifica Base-PV, variando porcentualmente las categorías de: *servicios de ingeniería, módulos FV y subestructura (trackers)* según cotizaciones de costos entre FV a AgriPV; esto último también añade incertidumbre a los resultados de este trabajo, lo que dificulta su credibilidad. Con esto en mente, se realizan distintos análisis de sensibilidad que procuran compensar la incertidumbre existente, especialmente para el caso del aumento de costos por parte de la subestructura AgriPV, que es el costo que presenta mayor diferencia entre el sistema FV convencional y el AgriPV.

A partir de los resultados de la Tabla 3.6, así como los análisis de sensibilidad de las Tablas 3.7 y 3.8, se puede establecer que un proyecto AgriPV presenta mayores costos que un sistema FV convencional, los cuales rondan entre 17 % y 56 % de aumento de costos. Cabe destacar que la estimación realizada (Base-APV) presenta un 36 %

de aumento de costos y que los análisis de sensibilidad se realizan netamente por la incertidumbre generada.

La principal diferencia de costos radica en la subestructura requerida para elevar los paneles, con un aumento de 200.000 [USD] aproximadamente. Luego, se encuentra la diferencia de costos de los Módulos FV debido a la implementación de paneles semi-transparentes, esto implica un aumento de 90.000 [USD] aproximadamente. El aumento de costos de los servicios de ingeniería es despreciable debido a que el aumento no llega a superar los 5.000 [USD].

Las diferencias de costos antes mencionadas aumentan la inversión inicial. Sin embargo, este sobrecosto puede verse compensado por los beneficios que presenta el sistema AgriPV para el desarrollo del cultivo del frambueso, ya que:

- Mejoraría la ventilación comparado con las mallas de sombra.
- Reemplazaría el uso de mallas de sombra gracias a los paneles semi-transparentes.
- Existiría protección frente a granizo/precipitaciones que pudiesen dañar al cultivo.
- Podría lograrse un ahorro en el consumo de agua de riego gracias a la sombra generada por los módulos FV, debido a que disminuirían la evapotranspiración del cultivo.
- Se crearía un microclima para el frambueso, lo que promueve un entorno más controlado para el cultivo.
- Existiría protección frente a las cada vez más frecuentes olas de calor gracias a la sombra generada por los módulos FV.
- Se puede reemplazar al sistema de sujeción del frambueso gracias a las vigas de la subestructura.

De esta manera, se pueden lograr ahorros en medidas de protección agrícola y en requerimientos para el cultivo del frambueso. También se pueden lograr beneficios propios de la tecnología AgriPV, tales como la disminución en la tasa de riego y un ambiente más controlado para el frambueso, lo que genera seguridad para la producción agrícola a largo plazo.

Por otro lado, la Tabla 3.9 entrega análisis de sensibilidad en los cuales se mantiene la estimación realizada en Base-APV, pero aumentando los costos de la subestructura

en un menor porcentaje comparado con dicha estimación. De esta manera, se puede establecer que si se aumenta en un 50 % o un 100 % los costos de la subestructura, un sistema AgriPV sería un 18 % o 25 % más costoso que un sistema FV convencional. Este análisis es útil en casos en que existan tratos preferenciales con proveedores o diversas maneras de adquirir o fabricar la subestructura para el proyecto AgriPV.

Por último, resulta fundamental considerar los distintos modelos de negocio asociados al desarrollo de un proyecto AgriPV. Si una empresa EPC se limita únicamente a la construcción del sistema y no se hace cargo de la parte agrícola, los beneficios agronómicos no compensan el sobrecosto, pues dicha empresa no obtendría ventajas directas de la producción. En cambio, si la misma compañía asume tanto la construcción como la explotación agrícola, los beneficios ofrecidos por un sistema como el proyecto Piet Albers pueden justificar la inversión adicional que implica un AgriPV.

3.4.3. Conclusiones

El sistema AgriPV Piet Albers, al ser extrapolado a regiones frambueseras de Chile, **muestra un potencial de generación eléctrica significativamente mayor** al experimentado en Babberich, Países Bajos. El incremento, estimado **entre un 34 % y un 54 %**, implica que Chile es un país más competitivo en el desarrollo de la FV que Países Bajos en materias de potencial FV.

En el ámbito agrícola, el uso de paneles semi-transparentes es esencial para garantizar beneficios. A partir del análisis, se concluye que **los paneles semi-transparentes pueden usarse como reemplazo para las mallas de sombra y granizo**. Asimismo, contribuyen a disminuir la altura total de la subestructura debido a su capacidad de transmitir un porcentaje de la luz incidente y lograr ubicarse cercano a la altura máxima del cultivo. Por otro lado, **el uso de subestructura específica permite un sistema robusto de construcción con potencial para contribuir al desarrollo de cultivos**. En este caso, la subestructura se usa para mejorar la ventilación del cultivo (en conjunto de la orientación de los módulos FV), así como sus vigas se usan para reemplazar el sistema de soporte del frambueso.

Para extrapolar el sistema AgriPV Piet Albers a Chile, se recomienda particularmente:

- Aumentar la distancia de paso dentro de la estructura FV, mejorando la ventilación del cultivo en el contexto chileno.
- Analizar la transmitancia de los paneles semi-transparentes con el fin de que estos puedan ser usados para reemplazar las mallas de sombras en los cultivos.
- Mantener los paneles con su funcionalidad de techo para que de esta manera puedan proteger al cultivo de las precipitaciones otoñales y granizo.
- Usar macetas que coincidan con la construcción y hacer uso de las vigas del sistema AgriPV para hacer el sistema de sujeción del frambueso.

Por otro lado, los resultados del análisis de costos confirman que **un sistema AgriPV presenta una inversión inicial superior respecto a un proyecto FV convencional, con incrementos totales estimados de un 36 % para este caso de análisis**. A pesar de esto, **el sobrecosto tiene el potencial de ser compensado por los beneficios a largo plazo que AgriPV ofrece**. Dicho aumento se atribuye, principalmente, a la

subestructura necesaria para elevar los paneles (alrededor de 200.000 [USD] adicionales) y, en menor medida, a la implementación de módulos semi-transparentes (90.000 [USD] aproximados). Con esto en mente, **otorgar mayores beneficios a la agricultura mediante AgriPV, implica una mayor inversión en sistemas con soporte elevado y altura libre, los cuales obligatoriamente tendrán un mayor costo en la subestructura**.

No obstante, la rentabilidad global depende del modelo de negocio adoptado: si una empresa EPC asume solo la construcción, sin involucrarse en la producción agrícola, los beneficios agrícolas no compensan totalmente el incremento en los costos; en cambio, cuando la misma empresa participa también en la explotación frutícola, el sobrecosto puede considerarse una inversión rentable gracias a las ventajas agronómicas y ambientales del sistema. Por ello, la decisión de implementar AgriPV debe evaluar si el aumento en la inversión inicial se ve justificado por los beneficios productivos y económicos a largo plazo, determinando además quién asume la producción agrícola y cómo el sistema encaja en la estructura de cada proyecto.

En lo relativo a la selección de casos agrícolas representativos para el AgriPV en Chile, **los cultivos que son más aptos para el AgriPV están relacionados a una integración eficiente con estructuras FV**. Eso implica que las características y el método del cultivo debe ser factible para el diseño FV, mientras que el cultivo también tiene exigencias como ser tolerante a la sombra y, ojalá, no disminuir sus rendimientos. A partir de esto, se concluye que existe una mayor aptitud técnica para implementar sistemas AgriPV en cultivos permanentes de altura moderada y requerimientos lumínicos medios-altos, tales como el cerezo, representativo de la región Metropolitana y O´Higgins; el avellano europeo, representativo de la región del Ñuble, La Araucanía y Los Lagos y el arándano americano, representativo de la región del Biobío y Los Ríos. Estos cultivos permiten una posible integración con estructuras FV debido a su uso en huertos modernos con alturas manejables y tolerancia parcial a la sombra. Considerando entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, **los frutales con mayor potencial según superficie total cultivada son el cerezo, el avellano y la vid de mesa con 66.958 [ha], 36.330 [ha] y 27.793 [ha] respectivamente**.

3.4.4. Recomendaciones

A partir de los análisis realizados y conclusiones, se derivan recomendaciones para contribuir al cumplimiento del objetivo general de este trabajo de investigación. Además, se identifica un nuevo eje de acción para las recomendaciones, siendo este el eje de investigación.

3.4.4.1. Incentivos financieros

Convocar licitaciones para proyectos AgriPV que hagan uso de paneles FV semi-transparentes debido a sus beneficios para la agricultura

Internacionalmente se han corroborado los beneficios que traen los paneles semi-transparentes para la agricultura al proteger cultivos de climas adversos y reemplazar mallas de protección en agricultura (de sombra y granizo). Este tipo de tecnología, al lograr transmitir parte de la luz incidente a la explotación agrícola, permite la ubicación de los módulos FV con mayor cercanía al cultivo sin pérdidas sustanciales de rendimiento, paralelamente, la altura de la subestructura FV es menor logrando un ahorro de costos al disminuir la altura total del sistema.

Para potenciar estas ventajas en el contexto chileno, se recomienda, por un lado, **crear licitaciones para proyectos AgriPV con la implementación de paneles semitransparentes** y, por otro, desarrollar, junto con el Ministerio de Energía y el Ministerio de Agricultura, **lineamientos técnicos que fijen requisitos mínimos de beneficios agrícolas para poder optar a esta licitación**. No obstante, antes de establecer estos lineamientos de forma definitiva, resulta crucial implementar proyectos piloto en diferentes zonas del país que posean potencial AgriPV, de modo que se validen en terreno los beneficios planteados por la experiencia internacional y así, los módulos semi-transparentes sean promovidos por sus beneficios para la agricultura.

3.4.4.2. Investigación

Investigar el impacto de paneles FV semi-transparentes en cultivos frutícolas representativos para Chile mediante la promoción de proyectos piloto

Con el propósito de validar la implementación de paneles FV semi-transparentes en el sector agrícola chileno y basándose en los resultados de este trabajo, se recomienda realizar proyectos piloto con dichos paneles en cultivos frutícolas representativos de cada región, según mayor superficie cultivada y potencial con la tecnología AgriPV. Entonces, considerando lo anterior y las regiones con mayor potencial AgriPV, se propone el uso de la Tabla 3.12 para la selección de cultivos por región.

Posteriormente, se propone evaluar el impacto de los paneles semi-transparentes realizando mediciones de parámetros ligados a la investigación AgriPV al comparar un terrenos próximos con AgriPV (con módulos semi-transparentes) y un sitio de referencia. La idea es que ambos lugares posean las mismas condiciones agrícolas para que la medición de parámetros sea válidamente comparable. Se proponen los siguientes factores para medir:

- Irradiación.
- Cantidad de cosecha por área.
- Calidad de cosecha.
- Humedad del suelo.
- Temperatura del aire y/o suelo.

Estudiar la factibilidad de modelos de negocio AgriPV para distintos segmentos del rubro eléctrico

Para potenciar la adopción de AgriPV en Chile, resulta esencial analizar los modelos de negocio que mejor se adapten a las particularidades de cada segmento eléctrico (Net Billing, PMGD y Utility). En el caso de *Net Billing*, la implementación de sistemas de menor escala, orientados al autoconsumo, podría beneficiar directamente a agricultores al reducir sus costos energéticos y al mismo tiempo brindar protección contra condiciones climáticas adversas. Por su parte, el segmento *PMGD* permite inyectar energía

a la red distribuida, requiriendo un equilibrio entre el diseño del AgriPV (que preserve la actividad agrícola) y la ubicación estratégica cerca de la infraestructura eléctrica, lo cual supone una oportunidad para terrenos agrícolas. Finalmente, en proyectos *Utility*, de mayor envergadura, se deben considerar mecanismos de venta de energía a largo plazo y acuerdos con inversionistas que reconozcan los beneficios agrícolas dentro de la estructura financiera del proyecto.

Con esto en mente, se recomienda realizar estudios de factibilidad técnico-económica para cada segmento considerando los modelos de negocio de AgriPV, usando la Figura 3.14 como referencia acerca de distintos modelos de negocio AgriPV.

Modelo de negocio (punto de vista del agricultor)	Función			
	Proveer terreno	Gestión agrícola	Proveer Sistema FV	Operar Sistema FV
1. Todas las Funciones	Agricultor			
2. Propietario de Terreno Externo	Propietario terreno	Agricultor		
3. Inversión Externa en FV	Agricultor		Inversores FV	Agricultor / Operador FV
4. Sólo Gestión Agrícola y Operación FV	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Agricultor
5. Sólo Gestión Agrícola	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Operador FV

Figura 3.14: Configuración de distintos modelos de negocio AgriPV donde interactúan entidades como: propietario de terreno, agricultor, inversores FV y operador FV [18].

Basándose en la Figura 3.14, se propone utilizar el modelo de negocio *1. Todas las funciones* y *2. Propietario de terreno externo* para evaluar el segmento Net Billing. Mientras que se recomienda aplicar los modelos de negocio *3. Inversión externa en FV*, *4. Sólo gestión agrícola y operación FV* y *5. Sólo gestión agrícola* para el caso de los segmentos PMGD y Utility. De esta manera, **se podrá identificar los incentivos o regulaciones necesarias para impulsar la adopción masiva del AgriPV en diversas escalas**, promoviendo así una solución integral que contribuya tanto a la resiliencia de la agricultura como a la transición energética en Chile.

Además, el análisis de costos del proyecto Piet Albers realizado en este trabajo (sistema AgriPV de frambuesas), indica que un proyecto AgriPV de escala PMGD (≈ 3 [MWp]) implicaría un sobrecosto cercano al 36 % respecto de una planta FV convencional, debido principalmente a la subestructura elevada y al uso de paneles semi-transparentes.

Contar con esta referencia, aporta un punto de partida realista para los estudios de factibilidad en sistemas de mediana escala, ya que permite dimensionar la inversión adicional y contrastarla con los beneficios agrícolas y energéticos esperados, contribuyendo así con los modelos de negocio propuestos para el segmento PMGD.

Capítulo 4

Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones generales

La tecnología AgriPV es una aplicación de doble uso del suelo que integra la producción agrícola con la generación de energía solar en una misma superficie. **Su principio fundamental consiste en otorgar beneficios a la agricultura mediante el uso de paneles FV en el mismo terreno**, permitiendo la convivencia de dos rubros que generalmente compiten por la misma superficie. Entre los beneficios para el rubro agrícola, destaca la **capacidad de ofrecer mayor resiliencia ante el cambio climático para los cultivos**:

- Se puede brindar protección contra condiciones climáticas adversas, entre estas se encuentra el exceso de radiación solar, precipitaciones y granizo, pudiendo reemplazar mallas de sombra y mallas de granizo.
- La sombra creada por los paneles FV puede promover un microclima más controlado y reducción en la tasa de riego.

Por el lado del rubro energético, la tecnología AgriPV puede destinarse para soluciones de auto-consumo en pequeña escala (riego tecnificado, por ejemplo), mientras que en mediana o gran escala permite la creación de nuevos puntos de conexión a la red y generación eléctrica distribuida, lo que beneficia la transición energética. A su vez, al potenciar la convivencia de dos rubros que generalmente compiten por el uso del suelo, la tecnología AgriPV puede generar beneficios sociales y económicos, logrando incentivar el trabajo local para la mantención del cultivo y el sistema FV.

El AgriPV se clasifica generalmente según la disposición de los paneles FV, existiendo sistemas AgriPV *con soporte elevado y altura libre*, en los que los módulos se ubican sobre los cultivos, pudiendo generar un microclima específico y brindar cierta protección frente a precipitaciones. Por otro lado, existen sistemas AgriPV *con cultivos entre hileras*, que pueden permitir el uso de maquinaria agrícola entre los paneles FV y/o otorgar sombra al cultivo.

Dentro de las tecnologías más relevantes del AgriPV, se encuentra el uso de paneles semi-transparentes que transmiten una parte de la luz solar a los cultivos, optimizando la fotosíntesis frente a los paneles opacos que no permiten la transmisión de luz. Además, el diseño y uso de subestructura específica permite la coexistencia de la FV con la agricultura, lo que es vital para garantizar los beneficios del AgriPV.

4.1.1. Experiencia internacional en AgriPV

Los beneficios anteriormente mencionados se han dado a conocer según la experiencia internacional en el desarrollo AgriPV. Esta tecnología nace en Alemania como concepto, pero se implementa primariamente en Japón, donde nace el modelo *Solar Sharing*, que incentiva la continuidad de la actividad agrícola permitiendo un mínimo del 66 % de rendimiento y fomentando proyectos de pequeños agricultores para evitar el abandono de terrenos debido a migración. Luego, en Alemania se realizó una investigación llamada *APV-RESOLA* que compara cultivos con AgriPV y agricultura convencional en agricultura seca, donde se concluye que **las variaciones en los rendimientos agrícolas dependen en gran medida de las condiciones climáticas**, por ejemplo, las papas variaron su rendimiento de un 20 % menos en 2017 a un 11 % más en 2018, un año caracterizado por ser seco y caliente, **sugiriendo que el AgriPV podría ser beneficioso en contexto de sequía**. Un caso de estudio con tomates en EE.UU. muestra que **la sombra que generan los módulos FV mejora la eficiencia hídrica de los cultivos**, aunque esto puede reducir el rendimiento de cultivos con más requerimientos lumínicos.

A la fecha, esta tecnología suma varios países con implementación, dentro de los cuales se encuentran:

- Italia, donde se distinguen entre sistemas AgriPV simples y AgriPV avanzados. Aquí se impulsa la subvención de fondos y simplificación de autorizaciones de construcción con el objetivo de promover modernización del campo mediante el

AgriPV avanzado.

- Alemania, país en el que se creó la norma DIN 91434, esta fija requerimientos técnicos con el objetivo de garantizar el uso agrícola primario dentro de un sistema AgriPV, así como reducir el riesgo técnico de todas las partes involucradas en el proyecto. Se definen límites para la pérdida de terreno agrícola así como la disminución de rendimiento del cultivo.
- Francia, que define al AgriPV como una tecnología que debe tener beneficios para la agricultura. Para esto se definen criterios cualitativos que resultan en un gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola, con este gradiente se puede establecer si los proyectos FV poseen más o menos sinergias con la agricultura y así clasificarlos según sinergia agrícola. Además, se debe garantizar que la producción agrícola sea la actividad principal del terreno así como la reversibilidad del sistema a la hora de terminar el proyecto.

Cabe destacar que existen más países que ya han implementado o que se encuentran en vías de implementación de la tecnología AgriPV.

4.1.2. Análisis de prefactibilidad para el AgriPV en Chile

4.1.2.1. Desafíos intersectoriales

Desafíos agrícolas

Chile es un país que ha sido notoriamente afectado por la crisis climática. La denominada *Megasequía*, acumuló 12 años con precipitaciones por debajo del promedio entre 2010 y 2022, resultando en gran parte de las regiones del centro de Chile en estado de crisis hídrica. Este periodo se superpone y acentúa una tendencia hacia un clima más seco observado desde la región de Coquimbo hasta la región de Aysén. En un caso pesimista y según proyecciones climáticas, el déficit de precipitaciones de la zona central puede llegar a superar el 30 %, es decir, una condición similar a la megasequía, pero en régimen permanente. Todo esto se traduce en una menor disponibilidad del recurso hídrico para el futuro.

En paralelo, se observa un aumento progresivo de la temperatura, evidenciado por el hecho de que ocho de los diez años más cálidos desde 1961 se concentran en las últimas

dos décadas, y por el 90 % de las estaciones meteorológicas de Chile continental que registran incrementos de temperatura. A esto se le suma el aumento de olas de calor, lo que confirma la tendencia al calentamiento.

La combinación de déficit hídrico, temperaturas extremas y eventos climáticos adversos revela un escenario complejo en el que la agricultura nacional enfrenta desafíos crecientes para asegurar la producción de alimentos. Con un futuro marcado por alzas de temperatura y disminuciones de precipitaciones, **Chile se perfila como un país altamente vulnerable al cambio climático, requiriendo medidas urgentes de adaptación y mitigación para salvaguardar su seguridad hídrica y alimentaria**.

Desafíos del sector energético

A pesar de que las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) representaron un 40,6 % de la generación eléctrica chilena durante el primer semestre de 2024, la capacidad de transmisión no ha acompañado el rápido crecimiento de este sector. Como consecuencia, un 13,5 % de la generación renovable entre abril de 2023 y abril de 2024 no pudo inyectarse a la red (vertimiento), evidenciando la necesidad de acercar las zonas de producción a las de consumo, especialmente en la región centro, centro-sur y centro-norte del país. Por otro lado, la mayoría de la capacidad ERNC instalada corresponde a grandes sistemas fotovoltaicos (Utility), no obstante, los segmentos de autoconsumo (NetBilling) y Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD) aún presentan oportunidades de crecimiento. En el caso de NetBilling, los agricultores pueden reducir costos energéticos mediante el uso de energía solar limpia y económica, siendo la tecnología AgriPV una alternativa viable en terrenos agrícolas. Por otro lado, los PMGD se enfocan en suministrar energía a la red distribuida, enfrentando el desafío de ubicarse cerca de la infraestructura eléctrica, lo que puede restringir la disponibilidad de terrenos idóneos.

4.1.2.2. Investigación aplicada y beneficios aplicables

En la Región Metropolitana de Chile, Fraunhofer Chile Research realizó tres proyectos piloto AgriPV con el fin de estudiar las implicaciones de la agrivoltaica en la generación de energía solar y la productividad agrícola, comparando los proyectos piloto AgriPV con zonas de referencia. Los resultados arrojaron que en verano del 2021 **se midió una**

media del 29 % más de humedad de suelo en la zona bajo los paneles mientras que el sombreado redujo la irradiación solar en un 40 % y la temperatura del suelo en aproximadamente 3 [°C], demostrando el potencial de la tecnología AgriPV de crear un entorno más controlado para los cultivos y por tanto, influir positivamente en la productividad de la tierra, especialmente considerando que AgriPV presenta mayores beneficios en climas semiáridos comparables a los de la zona centro-norte de Chile.

Ante la experiencia internacional y los resultados mencionados, se desprende que Chile posee una gran oportunidad para el desarrollo de la tecnología AgriPV, pudiendo proteger a los cultivos de las olas de calor, de la radiación solar directa y el estrés hídrico, teniendo la oportunidad de reemplazar mallas de sombra mediante paneles solares. Además, los módulos FV poseen el potencial para proteger cultivos de granizos y lluvias al usarse de techo, reemplazando las mallas de protección. De esta manera, **la implementación AgriPV posee el potencial de aumentar la resiliencia climática y la seguridad hídrica de cultivos durante todo el año en Chile**.

A partir de lo anterior, **el AgriPV se perfila como una medida de adaptación ante el cambio climático en Chile, al ofrecer protección para los cultivos frente a condiciones climáticas adversas y reducción de la pérdida de agua por evapotranspiración**.

4.1.2.3. Selección de cultivos representativos en regiones con potencial AgriPV

Para evaluar el potencial de la tecnología AgriPV en Chile, se seleccionan casos representativos desde la región de Coquimbo hasta la región de Los Lagos, centrándose en cultivos frutícolas que, al ser permanentes, ofrecen una mayor viabilidad para esta aplicación. El proceso de selección parte con la identificación de los cultivos con mayor superficie de siembra para cada región según los catastros regionales de la ODEPA (hasta 2024), luego se evalúa la compatibilidad de cada cultivo con AgriPV al establecer rangos de altura y requerimientos lumínicos. La idea es que posean modalidades de siembra que no superen los 3 [m] de altura para no encarecer de sobremanera el costo de la subestructura. Los resultados se presentan en la Tabla 4.2 y 4.3.

A partir de los resultados, **los cultivos que son más aptos para el AgriPV están relacionados a una integración eficiente con estructuras FV**. Eso implica que las características y el método del cultivo debe ser factible para el diseño FV, mientras

que el cultivo también tiene exigencias como ser tolerante a la sombra y, ojalá, no disminuir sus rendimientos. A partir de esto, se concluye que existe una mayor aptitud técnica para implementar sistemas AgriPV en cultivos permanentes de altura moderada y requerimientos lumínicos medios-altos, tales como el cerezo, representativo de la región Metropolitana y O´Higgins; el avellano europeo, representativo de la región del Ñuble, La Araucanía y Los Lagos y el arándano americano, representativo de la región del Biobío y Los Ríos. Estos cultivos permiten una posible integración con estructuras FV debido a su uso en huertos modernos con alturas manejables y tolerancia parcial a la sombra. **Considerando entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, los frutales con mayor potencial según superficie total cultivada son el cerezo, el avellano y la vid de mesa con 66.958 [ha], 36.330 [ha] y 27.793 [ha] respectivamente**.

4.1.2.4. Análisis de proyecto específico: cultivo de frambuesa en sistema AgriPV

Sumado a lo anterior, se aterriza el potencial del AgriPV en Chile a través del análisis de diseño y costos de un proyecto AgriPV existente con el objetivo final de analizar la prefactibilidad de un sistema de estas características dentro del entorno chileno. Para esto, se selecciona como caso de estudio el proyecto AgriPV **Piet Albers**, desarrollado por GroenLeven en Babberich, Países Bajos; que consiste en un cultivo de frambuesas con una potencia FV instalada de 2,7 [MWp]. Posee módulos FV semi-transparentes y un diseño en forma de techo para proteger los cultivos del granizo y precipitaciones. Al consistir en un cultivo de frambuesa, se analizará el diseño dentro de las tres regiones con más superficie cultivada de frambueso, siendo estas: Ñuble, Maule y La Araucanía, respectivamente.

El sistema AgriPV Piet Albers, al ser extrapolado a regiones frambueseras de Chile, **muestra un potencial de generación eléctrica significativamente mayor** al experimentado en Babberich, Países Bajos. El incremento, estimado **entre un 34 % y un 54 %**, implica que Chile es un país más competitivo en el desarrollo de la FV que Países Bajos en materias de potencial FV, lo que es más atractivo para inversionistas.

En el ámbito agrícola, el uso de paneles semi-transparentes es esencial para garantizar beneficios. A partir del análisis, se concluye que **los paneles semi-transparentes pueden usarse como reemplazo para las mallas de sombra y granizo**. Asimismo, contribuyen a disminuir la altura total de la subestructura debido a su capacidad de transmitir un porcentaje de la luz incidente y lograr ubicarse cercano a la altura máxima

del cultivo. Por otro lado, **el uso de subestructura específica permite un sistema robusto de construcción con potencial para contribuir al desarrollo de cultivos**. En este caso, la subestructura se usa para mejorar la ventilación del cultivo (en conjunto de la orientación de los módulos FV), así como sus vigas se usan para reemplazar el sistema de soporte del frambueso.

Por otro lado, los resultados del análisis de costos confirman que **un sistema AgriPV presenta una inversión inicial superior respecto a un proyecto FV convencional, con incrementos totales estimados de un 36 % para este caso de análisis**. A pesar de esto, **el sobrecosto puede verse compensado por los beneficios a largo plazo que AgriPV ofrece al cultivo de frambuesas**, como la mejora en la ventilación, la protección frente a eventos climáticos adversos (granizo, olas de calor, exceso de radiación), la disminución de la tasa de riego y la posible sustitución de mallas de sombra y sistemas de sujeción. Además, dicho aumento se atribuye, principalmente, a la subestructura necesaria para elevar los paneles (alrededor de 200.000 [USD] adicionales) y, en menor medida, a la implementación de módulos semi-transparentes (90.000 [USD] aproximados).

No obstante, la rentabilidad global depende del modelo de negocio adoptado: si una empresa EPC asume solo la construcción, sin involucrarse en la producción agrícola, los beneficios agrícolas no compensan totalmente el incremento en los costos; en cambio, cuando la misma empresa participa también en la explotación frutícola, el sobrecosto puede considerarse una inversión rentable gracias a las ventajas agronómicas y ambientales del sistema. Por ello, la decisión de implementar AgriPV debe evaluar si el aumento en la inversión inicial se ve justificado por los beneficios productivos y económicos a largo plazo, determinando además quién asume la producción agrícola y cómo el sistema encaja en la estructura de cada proyecto.

4.1.2.5. Desafíos para el AgriPV

A pesar de las ventajas y potencial del AgriPV en Chile, existen desafíos que dificultan la implementación y comercialización de esta tecnología a nivel país. Por un lado, **los costos asociados a la inversión inicial suelen ser mayores, derivados de la necesidad de adaptar el diseño FV a la agricultura** y la dificultad para monetizar sinergias, como la conservación de tierras y la reducción de uso de agua, exige modelos de negocio específicos que hoy no cuentan con mecanismos claros de compensación en el mercado

chileno. En cuanto a lo legislativo, **la falta de diferenciación legal entre sistemas fotovoltaicos convencionales y AgriPV** dificulta notablemente un marco regulatorio que impulse su comercialización y brinde seguridad a los inversionistas, ya que **la legislación sobre uso de suelo no permite la construcción industrial (como la FV) en terrenos clasificados como agrícolas** y exige medidas ambientales que, aunque compatibles con la agricultura, limitan el desarrollo de proyectos a gran escala. Como consecuencia, los beneficios se concentran en el segmento de NetBilling, puesto que la falta de diferenciación legal entre AgriPV y FV convencional limita la construcción de sistemas AgriPV en los segmentos PMGD y Utility.

En materia de investigación y aspectos sociales, una adopción exitosa del AgriPV demanda un enfoque multidisciplinario, integrando agronomía, FV y ciencias sociales para diseñar sistemas adaptados a las condiciones locales y, aunque el desarrollo global de AgriPV ha mostrado resultados favorables, en Chile aún se requieren más proyectos piloto que validen la adaptación de distintos cultivos a escenarios climáticos específicos. A nivel social, subsiste un desequilibrio informativo y financiero entre el sector FV y los agricultores, lo que puede derivar en contratos desventajosos y expectativas poco realistas sobre el valor del suelo. Esta brecha de conocimiento hace urgente la educación y la definición de modelos de negocio que promuevan la complementariedad entre energía y agricultura, fortaleciendo la confianza de los distintos actores y asegurando un beneficio mutuo.

A pesar del potencial de AgriPV como una medida de adaptación ante el cambio climático en Chile, los desafíos mencionados estancan al AgriPV como solución innovadora en el entorno chileno.

4.1.3. Recomendaciones para el desarrollo del AgriPV en Chile

Las recomendaciones para el desarrollo del AgriPV en Chile se basan en los desafíos intersectoriales (agricultura y energía) interpretándolos como oportunidades y justificación para implementar la tecnología. Por un lado, se apunta a aumentar la resiliencia de los cultivos y su adaptabilidad ante el cambio climático; por otro, se promueve la transición energética y la generación distribuida de electricidad. Estas propuestas se basan en experiencias internacionales y apuntan a superar las barreras que dificultan la adopción de la tecnología en el contexto nacional. Así, se han definido cuatro ejes de acción para el diseño de marcos regulatorios:

- Marco jurídico.
- Incentivos financieros.
- Investigación.
- Red de actores.

A continuación, se describirán recomendaciones para los cuatro ejes de acción ya mencionados:

4.1.3.1. Marco jurídico

Diferenciar el AgriPV de la FV convencional

Se sugiere definir el AgriPV a través de una combinación de parámetros técnicos y objetivos numéricos medibles, adaptados al contexto chileno. El objetivo principal debe ser la protección de las tierras de cultivo y la promoción de la tecnología en los casos donde el AgriPV pueda ofrecer sus mayores beneficios agrícolas y socioeconómicos. **Se recomienda definir un máximo de reducción de terreno cultivable acorde a la realidad chilena**. Por ejemplo en Alemania se sugiere una reducción de entre un 10 % y 15 % en función de su propio contexto. Una definición por objetivos puede garantizar que los sistemas se implementen en áreas gravemente afectadas por la sequía o la desertificación, así como en regiones caracterizadas por pobreza de recursos hídricos y energéticos.

Definir el tipo uso de suelo para AgriPV en la normativa ambiental

Para el contexto chileno se propone mantener el uso de suelo agrícola en sistemas AgriPV por la continuidad de la utilización agrícola. El principio rector en este caso es la comparación con la instalación de estructuras de mallas de sombra fijas, en las que también se mantiene el uso agrícola. Otra oportunidad relevante para regular la implementación de AgriPV se identifica a través del sistema existente, administrado por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) gestionado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que evalúa el impacto al recurso suelo de los proyectos. Se propone usar la definición técnica ya recomendada, ofreciendo a las autoridades un esquema claro de evaluación para determinar si los proyectos cumplen con el nivel de beneficio y garantizando que el terreno agrícola pueda reutilizarse de forma normal tras la vida útil del sistema. Al conservar la clase el terreno agrícola, también se pueden mantener las mismas directrices fiscales para la producción agrícola.

Este enfoque permitiría una evaluación exhaustiva de cada propuesta de proyecto, asegurando beneficios para la actividad agrícola. **Se sugiere utilizar la definición técnica AgriPV en la normativa ambiental y sectorial aplicable para mantener el uso de suelo y así la continuidad de la actividad agrícola**. Además, considerando el impacto en el rendimiento agrícola y la pérdida de tierras productivas, podrían definirse medidas ambientales adecuadas, que serían mínimas por la continuidad de los cultivos.

Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola

Una oportunidad para implementar el sistema AgriPV en Chile lo otorga el Informe de Factibilidad de Construcción (IFC), que en áreas rurales otorga a propietarios de predios la posibilidad de realizar construcciones ajenas a la agricultura, siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas en la normativa y no se produzcan actividades incompatibles o nocivas para la agricultura de una zona determinada. El informe se fundamenta en el Artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y construcciones, Decreto 458, Ley 458. Los criterios para aplicar esta norma se encuentran contenidos en la Circular 296/2019 del SAG, la que establece criterios técnicos y otros complementarios a considerar: En cuanto a las competencias del SAG, el trámite consiste en que el propietario de un predio agrícola le solicite el IFC, presentando una serie de docu-

mentos. El SAG elabora un informe técnico basado en excavaciones y un análisis de las condiciones del entorno predial considerando la vocación agropecuaria del predio. Este informe evaluará suelos de alta prioridad agrícola clasificados en las categorías I, II y III, y eventualmente IV y VI, y forma la base de información para evaluar la autorización del proyecto.

En este contexto, **se recomienda considerar la inclusión del AgriPV como una instalación compatible y beneficiosa con una función directa de servicio para la agricultura**, debido a sus funcionalidades de adaptación al cambio climático y su factibilidad de ser integrada con la producción agrícola. Es fundamental prestar especial atención al concepto de "servicio" en este análisis, lo que supone que será clave asegurar que el sistema AgriPV cumple funciones beneficiosas para la agricultura. Al considerar el AgriPV como una excepción al IFC se pueden crear beneficios relevantes para el desarrollo de este tipo de iniciativas por la disminución de la incertidumbre en el desarrollo de estos proyectos y la simplificación de permisos constructivos.

Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV

Actualmente existe un sistema de control y seguimiento de aquellos compromisos ambientales adquiridos en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), a través de la la Superintendencia Del Medio Ambiente (SMA). Mientras que se podría considerar el ejemplo del proyecto a cargo del SAG. El enfoque utilizado en el proyecto "Ayla Solar" de O'Energy (SEIA, 2020), donde se estableció un mecanismo para documentar los rendimientos de las cosechas, podría servir como modelo para esto. Como opción, AgriPV puede recibir incentivos solo para la fruticultura, donde hay un alto nivel de valor agregado y poca probabilidad de que se abandone la producción agrícola. En general, **se propone establecer un límite máximo porcentual en la proporción de terreno que un agricultor individual puede destinar a la implementación de sistemas AgriPV**, garantizando que la producción agrícola permanezca como la principal fuente de ingresos. Se sugiere que estos porcentajes oscilen entre el 10 % y el 30 %. Además, se propone que las instituciones y los actores clave acuerden y validen conjuntamente los valores sugeridos, asegurando así una base consensuada y robusta para la evaluación.

4.1.3.2. Incentivos financieros

Considerar al mismo AgriPV como una medida de compensación debido a su impacto positivo como medida adaptativa ante el cambio climático

Para la implementación de sistemas AgriPV se recomienda clasificar los proyectos que entren al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) siguiendo el ejemplo de Francia (Figura 2.1), es decir, clasificar los proyectos FV según las sinergias agrícolas que presenten, siempre y cuando se desarrollen en suelo agrícola. El objetivo consiste en que el SEIA sea capaz de contraponer las medidas de compensación documentadas en la RCA con las sinergias agrícolas presentadas por el proyecto AgriPV evaluado. Por ejemplo, si un proyecto AgriPV ocupa el 10 % del terreno y dispone de 90 % para la producción agrícola, teóricamente se debiese compensar el uso del 10 % de terreno de la construcción FV. No obstante, a lo largo del texto se exponen los beneficios que la tecnología puede presentar y que, mediante una clasificación como la de Francia, se puede discernir si las sinergias entregadas por un proyecto AgriPV son altas, medias, bajas o nulas (o con mayores precisiones). Con esto en mente, un sistema AgriPV podría compensar por sí solo los impactos ambientales que genere mediante las sinergias que presenta para la agricultura, adaptando el cultivo al cambio climático, mejorando la producción agrícola, reduciendo el consumo de agua y mejorando los ingresos agrícolas, entre otros.

Con esto en mente, se podrían evitar o aminorar las medidas de compensación asociadas a proyectos AgriPV, lo que supone un incentivo económico al disminuir los costos destinados a compensar ambientalmente un proyecto FV de mediana o gran escala.

Establecer concursos de innovación de AgriPV mediante mecanismos existentes en el ecosistema chileno

Todavía no existe una promoción específica del AgriPV en los países latinoamericanos, lo que demuestra el potencial de Chile para desempeñar un papel pionero. A partir de esto, **se recomienda diseñar incentivos financieros que reconozcan las sinergias y beneficios a través de mecanismos y concursos presentes en el ecosistema chileno**. La Ley N°18.450 de Fomento al Riego y Drenaje en Chile corresponde a una buena práctica que ofrece una oportunidad para financiar la integración de sistemas AgriPV con la instalación o mejora de sistemas de riego. Esta ley fue actualizada en 2023 y permite el fomento de la inversión privada de obras de riego y drenaje, es administrada por la Comisión Nacional de Riego (CNR), institución que emplea un calendario anual de concursos que permite distribuir los recursos para el cofinanciamiento de obras menores (hasta 20.000 UF), obras medianas intra-prediales (desde 20.000 hasta 60.000 UF), obras medianas para organizaciones de regantes (desde 20.000 hasta 100.000 UF) y programas especiales, como son la pequeña agricultura (hasta 1.000 UF) entre otros. Este enfoque de financiación puede cubrir hasta el 95 % de la inversión para pequeños agricultores y se otorga por reembolso al concluir el proyecto, es una prometedora forma de promover la integración de AgriPV con todos sus beneficios.

Además, se sugiere, generar grupos dentro de los concursos de la Ley de Riego dedicados para proyectos AgriPV, o bien, permitir factores que favorezcan las condiciones de parámetros concursales de este tipo de proyectos respecto a fotovoltaicos convencionales: Por ejemplo, formular factores que valoricen la superficie agrícola ahorrada por estos proyectos, además de cuantificar el ahorro de agua y el equivalente de ambos parámetros en una nueva superficie potencial para riego. Lo anterior, permitirá mejorar las condiciones de postulación a los recursos de la Ley de Riego de este tipo de iniciativas.

Por otro lado, el Ministerio de Hacienda de Chile ha establecido un Green Bond Framework para emitir bonos verdes, sociales y sostenibles, orientados a promover una transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima. Dentro del presupuesto del gobierno central, los gastos elegibles incluyen exenciones fiscales y subsidios. Se ofrece financiamiento a entidades que apoyan estrategias ambientales, sociales y climáticas del país, incluyendo inversiones en infraestructura e innovación. Se ha diseñado

un proceso de decisión para determinar la elegibilidad de proyectos dentro del *Marco de Bonos Sostenibles*, que considera objetivos específicos y criterios de elegibilidad y exclusión. En este contexto, **se recomienda evaluar la tecnología AgriPV para financiar proyectos modelo, dado que combina beneficios energéticos, ambientales y sociales, ofreciendo una solución integral para áreas rurales**.

Convocar licitaciones para proyectos AgriPV que hagan uso de paneles FV semitransparentes debido a sus beneficios para la agricultura

Internacionalmente se han corroborado los beneficios que traen los paneles semitransparentes para la agricultura al proteger cultivos de climas adversos y reemplazar mallas de protección en agricultura (de sombra y granizo). Este tipo de tecnología, al lograr transmitir parte de la luz incidente a la explotación agrícola, permite la ubicación de los módulos FV con mayor cercanía al cultivo sin pérdidas sustanciales de rendimiento, paralelamente, la altura de la subestructura FV es menor logrando un ahorro de costos al disminuir la altura total del sistema.

Para potenciar estas ventajas en el contexto chileno, se recomienda, por un lado, **crear licitaciones para proyectos AgriPV con la implementación de paneles semitransparentes** y, por otro, desarrollar, junto con el Ministerio de Energía y el Ministerio de Agricultura, **lineamientos técnicos que fijen requisitos mínimos de beneficios agrícolas para poder optar a esta licitación**. No obstante, antes de establecer estos lineamientos de forma definitiva, resulta crucial implementar proyectos piloto en diferentes zonas del país que posean potencial AgriPV, de modo que se validen en terreno los beneficios planteados por la experiencia internacional y así, los módulos semi-transparentes sean promovidos por sus beneficios para la agricultura.

4.1.3.3. Investigación

Investigar el impacto de paneles FV semi-transparentes en cultivos frutícolas representativos para Chile mediante la promoción de proyectos piloto

Con el propósito de validar la implementación de paneles FV semi-transparentes en el sector agrícola chileno y basándose en los resultados de este trabajo, se recomienda realizar proyectos piloto con dichos paneles en cultivos frutícolas representativos de

cada región, según mayor superficie cultivada y potencial con la tecnología AgriPV. Entonces, considerando lo anterior y las regiones con mayor potencial AgriPV, se propone la siguiente lista (Tabla 4.1) según lo señalado anteriormente:

Tabla 4.1: Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV y propuestos para investigación AgriPV con paneles semi-transparentes.

Región	**Cultivo frutícola representativo**	**Superficie cultivada del cultivo en la región [ha] [21]**
Coquimbo	Mandarino	5.240
Valparaíso	Vid de Mesa	8.413
Metropolitana	Cerezo	5.430
O´Higgins	Cerezo	29.935
Maule	Cerezo	27.818
Ñuble	Avellano	6.559
Biobío	Arándano Americano	1.768
La Araucanía	Avellano	8.438
Los Ríos	Arándano Americano	1.802
Los Lagos	Avellano	1.412

Posteriormente, se propone evaluar el impacto de los paneles semi-transparentes realizando mediciones de parámetros ligados a la investigación AgriPV al comparar un terrenos próximos con AgriPV (con módulos semi-transparentes) y un sitio de referencia. La idea es que ambos lugares posean las mismas condiciones agrícolas para que la medición de parámetros sea válidamente comparable. Se proponen los siguientes factores para medir:

- Irradiación.
- Cantidad de cosecha por área.
- Calidad de cosecha.
- Humedad del suelo.
- Temperatura del aire y/o suelo.

Estudiar la factibilidad de modelos de negocio AgriPV para distintos segmentos del rubro eléctrico

Para potenciar la adopción de AgriPV en Chile, resulta esencial analizar los modelos de negocio que mejor se adapten a las particularidades de cada segmento eléctrico (Net Billing, PMGD y Utility). En el caso de *Net Billing*, la implementación de sistemas de menor escala, orientados al autoconsumo, podría beneficiar directamente a agricultores al reducir sus costos energéticos y al mismo tiempo brindar protección contra condiciones climáticas adversas. Por su parte, el segmento *PMGD* permite inyectar energía a la red distribuida, requiriendo un equilibrio entre el diseño del AgriPV (que preserve la actividad agrícola) y la ubicación estratégica cerca de la infraestructura eléctrica, lo cual supone una oportunidad para terrenos agrícolas. Finalmente, en proyectos *Utility*, de mayor envergadura, se deben considerar mecanismos de venta de energía a largo plazo y acuerdos con inversionistas que reconozcan los beneficios agrícolas dentro de la estructura financiera del proyecto.

Con esto en mente, se recomienda realizar estudios de factibilidad técnico-económica para cada segmento considerando los modelos de negocio de AgriPV, usando la Figura 4.1 como referencia acerca de distintos modelos de negocio AgriPV.

Modelo de negocio (punto de vista del agricultor)	Función			
	Proveer terreno	Gestión agrícola	Proveer Sistema FV	Operar Sistema FV
1. Todas las Funciones	Agricultor			
2. Propietario de Terreno Externo	Propietario terreno	Agricultor		
3. Inversión Externa en FV	Agricultor		Inversores FV	Agricultor / Operador FV
4. Sólo Gestión Agrícola y Operación FV	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Agricultor
5. Sólo Gestión Agrícola	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Operador FV

Figura 4.1: Configuración de distintos modelos de negocio AgriPV donde interactúan entidades como: propietario de terreno, agricultor, inversores FV y operador FV [18].

Basándose en la Figura 4.1, se propone utilizar el modelo de negocio *1. Todas las funciones* y *2. Propietario de terreno externo* para evaluar el segmento Net Billing. Mientras que se recomienda aplicar los modelos de negocio *3. Inversión externa en FV*, *4. Sólo gestión agrícola y operación FV* y *5. Sólo gestión agrícola* para el caso de

los segmentos PMGD y Utility. De esta manera, **se podrá identificar los incentivos o regulaciones necesarias para impulsar la adopción masiva del AgriPV en diversas escalas**, promoviendo así una solución integral que contribuya tanto a la resiliencia de la agricultura como a la transición energética en Chile.

Además, el análisis de costos del proyecto Piet Albers realizado en este trabajo (sistema AgriPV de frambuesas), indica que un proyecto AgriPV de escala PMGD (≈ 3 [MWp]) implicaría un sobrecosto cercano al 36 % respecto de una planta FV convencional, debido principalmente a la subestructura elevada y al uso de paneles semi-transparentes. Contar con esta referencia, aporta un punto de partida realista para los estudios de factibilidad en sistemas de mediana escala, ya que permite dimensionar la inversión adicional y contrastarla con los beneficios agrícolas y energéticos esperados, contribuyendo así con los modelos de negocio propuestos para el segmento PMGD.

4.1.3.4. Red de actores

Mesa de trabajo AgriPV

Para abordar las cuestiones legislativas y utilizar así los beneficios socioeconómicos de la tecnología AgriPV de forma políticamente controlada, se recomienda la formación de una mesa de trabajo con actores multidisciplinarios, incluyendo al SAG, el Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Riego, empresas de los rubros, y entidades de la academia. Alineado a la experiencia internacional y considerando el potencial en territorio chileno, se subraya la importancia de la implicación de las instituciones del sector agrícola para desarrollar el AgriPV de cara a los retos presentes en la agricultura chilena.

Considerar el AgriPV en convocatorias i+D+i

Se propone la creación de fondos de I+D+i gestionados por entidades como CORFO o ANID, en colaboración entre universidades, institutos de investigación y socios industriales. Estos fondos permitirían acelerar el desarrollo de soluciones AgriPV adaptadas al contexto local, particularmente en materias de investigación y proyectos piloto relevantes. En este caso, las licitaciones específicas para tecnologías para el doble uso de la capacidad de suelo, podrían dar un impulso decisivo.

Sensibilización, promoción y difusión de AgriPV

Para maximizar la materialización de sistemas AgriPV, es esencial intensificar la sensibilización y educación, tanto de agricultores como de consultores de riego, así como de desarrolladores de proyectos ERNC. Esto se aplica a través de ferias, exposiciones y la colaboración con organizaciones, como el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y la Fundación para la Innovación Agraria. Además, se recomienda realizar entrevistas con tal de conocer el contexto social y operacional de los rubros, para así promocionar una política pública de sensibilización y educación de AgriPV entre sus posibles usuarios.

4.2. Conclusiones específicas

4.2.1. Identificar y sintetizar diversas tecnologías agrofotovoltaicas mediante revisión bibliográfica

El AgriPV hace uso dual del suelo, aprovechando el emplazamiento de paneles solares sobre suelo agrícola, con el objetivo de otorgar beneficios y sinergias a la agricultura [18]. Dentro de Chile existe una gran variabilidad climática, lo que implica que el uso de esta tecnología no es apto para todo el territorio chileno, es más, se sabe que el AgriPV posee potencial en zonas semi-áridas [37], lo que coincide con la zona centro-norte, central y centro-sur de Chile. A partir de esto, se pueden otorgar beneficios tales como: **medidas contra la desertificación, protección de cultivos (frente a radiación solar, olas de calor, granizos, precipitaciones, etc) y/o sinergias entre cultivos (mejora de microclima, reducción de tasa de riego, entre otros) [18]**.

Con estos beneficios en mente, los pasos a seguir para implementar esta tecnología deben contemplar un rol coherente con las necesidades del cultivo a lo largo de su desarrollo. Para esto es fundamental que se cumplan sinergias o exista algún beneficio para el cultivo, con tal de que se justifique el uso del AgriPV como medida de adaptación para el cambio climático, ya que sus beneficios van de la mano con promover la resiliencia climática de la explotación agrícola. En resumen, si se quiere implementar el AgriPV, se necesita ser coherente con el entorno y entregar sinergias a los cultivos.

A continuación, se detallarán sinergias claves del AgriPV y como se disponen sus tecnologías para así cumplir dichas sinergias.

4.2.1.1. Gestión de sombra

A través de una correcta gestión de la sombra generada por los paneles solares se puede lograr:

Reducción de la tasa de riego

A partir de la sombra generada por los paneles solares, puede existir una mayor conservación de la humedad en la tierra y reducción de la evapotranspiración del cultivo [18].

Además, en Chile este efecto se ha corroborado en la Región Metropolitana (RM), donde en base a proyectos piloto se logró observar un 29 % más de humedad bajo el sistema AgriPV en comparación con la zona abierta , así como una disminución aproximada de 3 [°C] en la temperatura del suelo [36].

En este caso, la tecnología que promueve la reducción de la tasa de riego vienen a ser principalmente los módulos FV, donde la sombra producida por estos, puede disminuir el uso de agua de riego [24]. La idea es que exista un sombreado parcial, con tal de disminuir la radiación directa y así mismo, la temperatura del suelo.

Por otro lado, se recomienda aplicar sistemas de riego tecnificados que puedan alimentarse con la misma energía eléctrica generada por los módulos FV.

Control de microclima

A partir de la existencia de los módulos FV, se puede crear un clima específico entre los paneles y el cultivo [25], al cual se le conoce como microclima. La idea central es gestionar dicho microclima para favorecer al cultivo, pudiendo crear generar un entorno más controlado entre los paneles y el cultivo [36].

Con respecto a las tecnologías que promueven este fenómeno, la instalación de módulos fotovoltaicos con sistemas de seguimiento (trackers) y el uso de paneles semi-transparentes son dos estrategias que pueden mejorar el microclima en un sistema AgriPV. Los paneles FV semi-transparentes pueden transmitir una parte de la luz solar a los cultivos situados debajo, lo que puede mejorar el rendimiento de los cultivos al controlar la cantidad y el espectro de luz que llega a las plantas [46].

A su vez, los seguidores solares pueden ajustar la orientación de los paneles según la posición del sol, regulando la sombra y la cantidad de luz, lo que reduce el estrés térmico y lumínico en las plantas [25]. Además, su flexibilidad promueve una mejor ventilación, previniendo condiciones favorables al desarrollo de enfermedades [25].

4.2.1.2. Protección de cultivos

La tecnología FV se puede usar para la protección de cultivos frente a fenómenos climáticos adversos.

Radiación solar

Al existir módulos FV que den sombra en la explotación agrícola, se puede usar como barrera protectora contra la radiación solar excesiva en el cultivo [47], potencialmente permitiendo el reemplazo de mallas de sombra que se usan actualmente en la agricultura. A partir de los resultados obtenidos de proyectos piloto en la Región Metropolitana de Chile, se ha logrado observar una reducción de la irradiación incidente en 40 % [36], mediante el uso de paneles bifaciales.

La tecnología AgriPV que contribuiría a disminuir la radiación solar corresponde al uso de paneles FV, esto con el objetivo de otorgar sombra directa o filtrar parte de radiación solar. Además, la existencia de seguidores solares (trackers) puede otorgar mayor o menor sombra según la necesidad, disminuyendo la exposición excesiva al sol.

Olas de calor

En Chile, ha existido un aumento sostenido de las olas de calor durante los últimos años [5], lo que induce el estrés hídrico en plantas pudiendo provocar daño fisiológico y **disminución del rendimiento** [33]. El AgriPV es una tecnología que puede ayudar a mitigar los efectos del calor gracias al uso de soportes elevados, pudiendo mantener el flujo aire o un diseño abierto [25].

A su vez, como la idea es proteger los cultivos tanto de la radiación directa como del calor extremo, la existencia de paneles FV también contribuye mitigando la radiación solar y así reduciendo el estrés en las plantas [47].

Granizo y precipitaciones

En Europa se ha hecho uso del AgriPV para proteger del granizo, donde se usan los módulos FV para reemplazar las mallas de granizo [48], haciendo de techo protector. Además, esta misma disposición puede disminuir los efectos adversos de las precipitaciones, como por ejemplo, los daños físicos que se pueden provocar a las flores cuando llueve [25].

Para habilitar dicha protección se suelen usar paneles semi-transparentes cercanos al cultivo, logrando hacer de barrera protectora ante el granizo [47] al mismo tiempo que

se permea la luz para el cultivo [46].

4.2.2. Extraer conclusiones a partir de políticas internacionales y recomendaciones regulatorias para la posible implementación Agrofotovoltaica en Chile

A la hora de diseñar marcos regulatorios que apoyen el desarrollo del AgriPV se han identificado tres ejes de acción:

- Marco jurídico.
- Incentivos financieros.
- Red de actores.

A continuación, se describirán recomendaciones para los tres ejes de acción ya mencionados.

4.2.2.1. Marco jurídico

Diferenciar el AgriPV de la FV convencional

Comparativa internacional: En el ámbito internacional se observa una variedad de enfoques para establecer un marco legal y con ello un ecosistema habilitador para el AgriPV. Un paso inicial crítico consiste en: 1. definir formalmente al AgriPV, 2. clarificar cómo se distingue de los sistemas FV convencionales y 3. derivar en qué contextos específicos su implementación resulta apropiada. Una definición inicial es fundamental para considerar el enfoque en los marcos legales pertinentes relacionados con el uso de suelo, permisos de construcción y legislaciones vinculadas con la generación de energía. En 2021, Alemania adoptó la normativa DINSPEC 91434 que estableció un máximo de entre 10 % y 15 % de reducción de superficie de cultivo [57]. En tanto, Francia definió una guía para los sistemas AgriPV [10] que fue la base para su adaptación legal bajo el Decreto nº 2024-318 de 2024 que introdujo metas numéricas relacionadas a la cantidad de cosecha y densidad de paneles [62]. En Italia se aplicó un enfoque mixto entre objetivos y requisitos técnicos mínimos [58].

Recomendación para Chile: Siguiendo los enfoques internacionales, **se sugiere definir el AgriPV a través de una combinación de parámetros técnicos y objetivos numéricos medibles, adaptados al contexto chileno**. El objetivo principal debe ser la protección de las tierras de cultivo y la promoción de la tecnología en los casos donde el AgriPV pueda ofrecer sus mayores beneficios agrícolas y socioeconómicos. **Se recomienda definir un máximo de reducción de terreno cultivable acorde a la realidad chilena**. Por ejemplo en Alemania se sugiere una reducción de entre un 10 % y 15 % en función de su propio contexto. Una definición por objetivos puede garantizar que los sistemas se implementen en áreas gravemente afectadas por la sequía o la desertificación, así como en regiones caracterizadas por pobreza de recursos hídricos y energéticos.

Definir el tipo uso de suelo de AgriPV en la normativa ambiental

Comparativa internacional: Considerando que el sistema AgriPV combina dos tipos diferentes de producción en un solo tipo de suelo, Japón introdujo por directriz una nueva clase de uso del suelo para el uso dual [61]. Por su parte, Alemania mantuvo el estatus de uso agrícola según el plan de utilización de suelo [18]. En Israel, en tanto, se gestiona el desarrollo geoespacial a través de la definición de zonas. Si una superficie ya se encuentra zonificada para AgriPV, el uso previsto de la tierra no puede cambiarse de agrícola sin penalización [18].

Recomendación para Chile: Para el contexto chileno se propone mantener el uso de suelo agrícola en sistemas AgriPV por la continuidad de la utilización agrícola. El principio rector en este caso es la comparación con la instalación de estructuras de malla sombra fijas, en las que también se mantiene el uso agrícola. Otra oportunidad relevante para regular la implementación de AgriPV se identifica a través del sistema existente, administrado por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) gestionado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que evalúa el impacto al recurso suelo de los proyectos. Se propone usar la definición técnica recomendada en su punto 4.1.1 (p.ej. reducción de porcentaje de superficie agrícola), ofreciendo a las autoridades un esquema claro de evaluación para determinar si los proyectos cumplen con el nivel de beneficio y garantizando que el terreno agrícola pueda reutilizarse de forma normal tras la vida útil del sistema. Al conservar la clase el terreno agrícola, también se pueden

mantener las mismas directrices fiscales para la producción agrícola.

Este enfoque permitiría una evaluación exhaustiva de cada propuesta de proyecto, asegurando beneficios para la actividad agrícola. **Se sugiere utilizar la definición técnica AgriPV en la normativa ambiental y sectorial aplicable para mantener el uso de suelo y así la continuidad de la actividad agrícola**. Además, considerando el impacto en el rendimiento agrícola y la pérdida de tierras productivas, podrían definirse medidas ambientales adecuadas, que serían mínimas por la continuidad de los cultivos.

Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola

Comparativa internacional: En Alemania se permite la construcción de sistemas AgriPV en tierras agrícolas mediante un privilegio especial si el proyecto comprueba servir directamente a una explotación agrícola o forestal [18]. Es notable que en países de gran extensión territorial como Brasil y en algunas regiones de los Estados Unidos, no existen barreras legislativas que impidan la integración de sistemas FV con actividades agrícolas.

Recomendación para Chile: Una oportunidad para implementar el sistema AgriPV en Chile lo otorga el Informe de Factibilidad de Construcción (IFC), que en áreas rurales otorga a propietarios de predios la posibilidad de realizar construcciones ajenas a la agricultura, siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas en la normativa y no se produzcan actividades incompatibles o nocivas para la agricultura de una zona determinada. El informe se fundamenta en el Artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y construcciones, Decreto 458, Ley 458. Los criterios para aplicar esta norma se encuentran contenidos en la Circular 296/2019 del SAG, la que establece criterios técnicos y otros complementarios a considerar: En cuanto a las competencias del SAG, el trámite consiste en que el propietario de un predio agrícola le solicite el IFC, presentando una serie de documentos. El SAG elabora un informe técnico basado en excavaciones y un análisis de las condiciones del entorno predial considerando la vocación agropecuaria del predio. Este informe evaluará suelos de alta prioridad agrícola clasificados en las categorías I, II y III, y eventualmente IV y VI, y forma la base de información para evaluar la autorización del proyecto.

En este contexto, **se recomienda considerar la inclusión del AgriPV como una instalación compatible y beneficiosa con una función directa de servicio para la agricultura**, debido a sus funcionalidades de adaptación al cambio climático y su factibilidad de ser integrada con la producción agrícola. Es fundamental prestar especial atención al concepto de "servicio" en este análisis, lo que supone que será clave asegurar que el sistema AgriPV cumple funciones beneficiosas para la agricultura. Al considerar el AgriPV como una excepción al IFC se pueden crear beneficios relevantes para el desarrollo de este tipo de iniciativas por la disminución de la incertidumbre en el desarrollo de estos proyectos.

Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV

Comparativa internacional: Para garantizar la continuidad de las actividades agrícolas en los sistemas AgriPV, se implementan incentivos financieros y mecanismos de supervisión en el nivel internacional. En Japón, un mecanismo estatal evalúa la actividad agrícola y el impacto de la sombra de los sistemas AgriPV en los rendimientos [61]. En Francia, se requiere reportar los resultados agrícolas a una institución de supervisión [10], mientras que Israel planea crear una unidad para asegurar el cumplimiento de la normativa AgriPV. En Europa, se reformularon las subvenciones agrícolas para que también cubran las tierras de doble uso, promoviendo su viabilidad económica [70]. Además, se identifica como factible solo promover sistemas AgriPV en sectores agrícolas particulares en los cuales haya un potencial alto de sinergia y un valor agregado elevado que haga improbable abandonar las actividades agrícolas. Este enfoque se implementó en Croacia, dónde se apoya la regulación a la implementación de AgriPV en la fruticultura [71].

Recomendación para Chile: En el contexto chileno **actualmente existe un sistema de control y seguimiento de aquellos compromisos ambientales adquiridos en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA)**, a través de la la Superintendencia Del Medio Ambiente (SMA). Mientras que se podría considerar el ejemplo del proyecto a cargo del SAG. El enfoque utilizado en el proyecto "Ayla Solar" de O'Energy (SEIA, 2020), donde se estableció un mecanismo para documentar los rendimientos de las cosechas, podría servir como modelo para esto. Como opción, AgriPV puede recibir

incentivos solo para la fruticultura, donde hay un alto nivel de valor agregado y poca probabilidad de que se abandone la producción agrícola. En general, **se propone establecer un límite máximo porcentual en la proporción de terreno que un agricultor individual puede destinar a la implementación de sistemas AgriPV**, garantizando que la producción agrícola permanezca como la principal fuente de ingresos. Se sugiere que estos porcentajes oscilen entre el 10 % y el 30 %. Además, se propone que las instituciones y los actores clave acuerden y validen conjuntamente los valores sugeridos, asegurando así una base consensuada y robusta para la evaluación.

4.2.2.2. Incentivos financieros

Considerar el AgriPV como una medida de compensación para proyectos por su impacto positivo en la eficiencia hídrica

Comparativa internacional: En Francia, se realizó un gradiente según criterios de calificación 2.1, donde dichos criterios responden a las siguientes preguntas:

- Criterio 1: ¿El proyecto AgriPV brinda un servicio a la operación?, ¿de qué naturaleza?
- Criterio 2: ¿Qué impacto tiene el sistema AgriPV en la producción agrícola (rendimiento cuantitativo y cualitativo)?
- Criterio 3: ¿Cuál es el impacto del sistema AgriPV en los ingresos agrícolas?

Al responder estas preguntas, se categoriza por separado mediante cada criterio al proyecto en cuestión y permite categorizar de manera general los sistemas AgriPV acorde al nivel de sinergia agrícola que presenten, desde los menos hasta los más virtuosos [10]. De esta manera, se puede observar el nivel de sinergia que presenta un proyecto en específico y, por lo tanto, dimensionar el nivel de impacto positivo que tendría para la explotación agrícola.

Por otro lado, esta herramienta es útil para medir los impactos positivos y negativos que presentan los proyectos AgriPV, donde, conforme existan menos impactos ambientales negativos, el proyecto será más sustentable y tendrá que presentar menos medidas ambientales.

Recomendación para Chile: Para la implementación de sistemas AgriPV se recomienda clasificar los proyectos que entren al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de manera similar al caso francés, es decir, clasificar los proyectos según las sinergias agrícolas que presenten. El objetivo consiste en que el SEIA sea capaz de contraponer las medidas de compensación asociadas al proyecto con las sinergias agrícolas presentadas por la tecnología. Por ejemplo, si un proyecto AgriPV ocupa el 10 % del terreno y dispone de 90 % para la producción agrícola, teóricamente se debiese compensar el uso del 10 % de terreno de la construcción FV (asumiendo que se mantiene el uso de suelo agrícola). No obstante, a lo largo del texto se exponen los beneficios que la tecnología puede presentar y que mediante una clasificación como la de Francia, se puede discernir si las sinergias entregadas por un proyecto AgriPV son altas, medias, bajas o nulas (o con mayores precisiones). Con esto en mente, un sistema AgriPV podría compensar por sí solo los impactos ambientales que genere mediante las sinergias que presenta para la agricultura, adaptando el cultivo al cambio climático, mejorando la producción agrícola, reduciendo el consumo de agua y mejorando los ingresos agrícolas, entre otros.

Establecer concursos de innovación de AgriPV que permitan monetizar las sinergias de la tecnología

Comparativa internacional: Para compensar costos adicionales del AgriPV se introdujeron distintas medidas en varios países. Desde 2017 hay licitaciones separadas para el AgriPV en Francia, donde el objetivo es alcanzar 15 [MWp] de capacidad instalada al año. Las adjudicaciones se basan, por una parte, en el precio ofrecido y, por otra, en el potencial sinérgico para la agricultura. El tamaño máximo de un proyecto es de 3 [MWp] de capacidad instalada y los proyectos que reciben subvenciones tienen garantizada una tarifa regulada durante 20 años. Desde 2018, en Massachusetts, Estados Unidos, el Estado concede subvenciones para los sistemas que se construyen en zonas designadas para la agricultura y no superan los 5 [MWp]. En Alemania, la tecnología se promovió inicialmente a través de concursos de innovación y se incluye en la Ley de Energías Renovables, y se define una prima tecnológica, que se paga como subvención fija sobre la cantidad de electricidad vendida para monetizar las sinergias creadas por la tecnología [18].

Recomendación para Chile: Todavía no existe una promoción específica del AgriPV en los países latinoamericanos, lo que demuestra el potencial de Chile para desempeñar un papel pionero. A partir de esto, **se recomienda diseñar incentivos financieros que reconozcan las sinergias y beneficios a través de mecanismos y concursos presentes en el ecosistema chileno**. La Ley N°18.450 de Fomento al Riego y Drenaje en Chile corresponde a una buena práctica que ofrece una oportunidad para financiar la integración de sistemas AgriPV con la instalación o mejora de sistemas de riego. Esta ley fue actualizada en 2023 y permite el fomento de la inversión privada de obras de riego y drenaje, es administrada por la Comisión Nacional de Riego (CNR), institución que emplea un calendario anual de concursos que permite distribuir los recursos para el cofinanciamiento de obras menores (hasta 20.000 UF), obras medianas intra-prediales (desde 20.000 hasta 60.000 UF), obras medianas para organizaciones de regantes (desde 20.000 hasta 100.000 UF) y programas especiales, como son la pequeña agricultura (hasta 1.000 UF) entre otros. Este enfoque de financiación puede cubrir hasta el 95 % de la inversión para pequeños agricultores y se otorga por reembolso al concluir el proyecto, es una prometedora forma de promover la integración de AgriPV con todos sus beneficios. **Además, se sugiere, generar grupos dentro de los concursos de la Ley de Riego dedicados para proyectos AgriPV, o bien, permitir factores que favorezcan las condiciones de parámetros concursales de este tipo de proyectos respecto a fotovoltaicos convencionales:** Por ejemplo, formular factores que valoricen la superficie agrícola ahorrada por estos proyectos, además de cuantificar el ahorro de agua y el equivalente de ambos parámetros en una nueva superficie potencial para riego. Lo anterior, permitirá mejorar las condiciones de postulación a los recursos de la Ley de Riego de este tipo de iniciativas.

Por otro lado, el Ministerio de Hacienda de Chile ha establecido un Green Bond Framework para emitir bonos verdes, sociales y sostenibles, orientados a promover una transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima. Dentro del presupuesto del gobierno central, los gastos elegibles incluyen exenciones fiscales y subsidios. Se ofrece financiamiento a entidades que apoyan estrategias ambientales, sociales y climáticas del país, incluyendo inversiones en infraestructura e innovación. Se ha diseñado un proceso de decisión para determinar la elegibilidad de proyectos dentro del "Marco de Bonos Sostenibles", que considera objetivos específicos y criterios de elegibilidad y exclusión. En este contexto, **se recomienda evaluar la tecnología AgriPV para financiar proyectos modelo, dado que combina beneficios energéticos, ambientales**

y sociales, ofreciendo una solución integral para áreas rurales.

4.2.2.3. Red de actores

Mesa de trabajo AgriPV

Recomendación para Chile: Para abordar las cuestiones legislativas y utilizar así los beneficios socioeconómicos de la tecnología AgriPV de forma políticamente controlada, se recomienda la formación de una mesa de trabajo con actores multidisciplinarios, incluyendo al SAG, el Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Riego, empresas de los rubros, y entidades de la academia. Alineado a la experiencia internacional, se subraya la importancia de la implicación de las instituciones del sector agrícola para desarrollar el AgriPV de cara a los retos presentes en la agricultura chilena.

Considerar el AgriPV en convocatorias i+D+i

Recomendación para Chile: Se propone la creación de fondos de I+D+i gestionados por entidades como CORFO o ANID, en colaboración entre universidades, institutos de investigación y socios industriales. Estos fondos permitirían acelerar el desarrollo de soluciones AgriPV adaptadas al contexto local. En este caso, las licitaciones específicas para tecnologías para el doble uso de la capacidad de suelo, podrían dar un impulso decisivo.

Sensibilización, promoción y difusión

Recomendación para Chile: Para maximizar la materialización de sistemas AgriPV, es esencial intensificar la sensibilización y educación, tanto de agricultores como de consultores de riego, así como de desarrolladores de proyectos ERNC. Esto se aplica a través de ferias, exposiciones y la colaboración con organizaciones, como el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y la Fundación para la Innovación Agraria. Además, se recomienda realizar entrevistas con tal de conocer el contexto social y operacional de los rubros, para así promocionar una política pública de sensibilización y educación de AgriPV entre sus posibles usuarios.

4.2.3. Seleccionar casos agrícolas representativos en Chile en función de la geografía y sus productos representativos

Para poder seleccionar casos agrícolas representativos en Chile para el AgriPV, se plantearán primeramente los siguientes criterios de selección:

1. La geografía se interpretará como regiones del país, por lo que se seleccionarán productos representativos por región de Chile analizando las zonas con mayor potencial; para ello, se abarcará desde la región de Coquimbo hasta la región de Los Lagos.
2. Por cada región se seleccionarán tres opciones relativas al rubro frutícola, siendo estas las que posean mayor superficie cultivada. Se filtra por el rubro frutícola debido a que generalmente son cultivos permanentes, por lo que presentan alta viabilidad con el AgriPV. Dicha información se obtendrá a partir de los últimos catastros de superficie frutícola regional realizados por la ODEPA.
3. Posteriormente, se investigará de manera general acerca de la altura mínima, altura máxima y los requerimientos lumínicos de los resultados obtenidos anteriormente. Con esta información se realizará un filtro acerca de si es pertinente/viable implementar sistemas AgriPV con cada cultivo dentro de los resultados.

El filtro para entender si es viable implementar sistemas AgriPV en cada cultivo, tendrá que ver con:

- La altura usual de cultivo: La idea es que esta altura sea lo menor posible, de esta manera los costos de la subestructura se pueden aminorar, lo que beneficiaría a la rentabilidad del sistema AgriPV.
- El requerimiento lumínico de cultivo: El objetivo es que la demanda de luz no sea a pleno sol, con tal de que el cultivo pueda tolerar los paneles solares sin disminuir su rendimiento.

Así, se pueden desprender cultivos frutícolas representativos por región con potencial para la tecnología AgriPV, los resultados se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Cultivos frutícolas representativos por región de Chile que se consideran aptos para el AgriPV, con su respectiva superficie cultivada en la región.

Región	Cultivo frutícola representativo	Superficie cultivada del cultivo en la región [ha] [21]
Coquimbo	Mandarino	5.240
Valparaíso	Vid de Mesa	8.413
Metropolitana	Cerezo	5.430
O´Higgins	Cerezo	29.935
Maule	Cerezo	27.818
Ñuble	Avellano	6.559
Biobío	Arándano Americano	1.768
La Araucanía	Avellano	8.438
Los Ríos	Arándano Americano	1.802
Los Lagos	Avellano	1.412

Además de la selección por región, se realiza un análisis entre la región de Coquimbo y Los Lagos, donde se realiza una escala jerarquizada según su superficie total cultivada de los frutales más representativos en dichas regiones. Los resultados se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Generalidades de interés de cultivos frutícolas más representativos de Chile (Entre la región de Coquimbo y Los Lagos): Superficie total cultivada, rango de altura y requerimiento lumínico.

Cultivo	Superficie total cultivada [ha] [21]	Porcentaje de la superficie total cultivada de frutales [%]	Altura mínima [m]	Altura máxima [m]	Requerimiento lumínico
Cerezo [78]	66.958	18 %	2	9	Alto
Avellano [79]	36.330	10 %	2	5	Medio - Alto
Vid de Mesa [80]	27.793	8 %	2	3	Alto
Nogal [81]	23.372	6 %	6	8	Alto
Palto [82]	20.434	6 %	2	15	Alto
Manzano Rojo [83]	18.136	5 %	2	10	Alto
Arándano Americano [84]	10.632	3 %	2	2.5	Medio - Alto
Ciruelo Europeo [85]	9.700	3 %	2	6	Medio - Alto
Mandarino [86]	5.240	1 %	3	5	Pleno sol
Olivo [87]	3.187	1 %	4	6	Pleno sol
Cranberry [88]	683	0 %	-	<0,5	Alto
Total de cultivos frutícolas	**363.784**	**100 %**	**-**	**-**	**-**

A partir de los resultados, **los cultivos que son más aptos para el AgriPV están relacionados a una integración eficiente con estructuras FV**. Eso implica que las características y el método del cultivo debe ser factible para el diseño FV, mientras que el cultivo también tiene exigencias como ser tolerante a la sombra y, ojalá, no disminuir sus rendimientos. A partir de esto, se concluye que existe una mayor aptitud técnica para implementar sistemas AgriPV en cultivos permanentes de altura moderada y requerimientos lumínicos medios-altos, tales como el cerezo, representativo de la región Metropolitana y O´Higgins; el avellano europeo, representativo de la región del Ñuble, La Araucanía y Los Lagos y el arándano americano, representativo de la región del Biobío y Los Ríos. Estos cultivos permiten una posible integración con estructuras FV debido a su uso en huertos modernos con alturas manejables y tolerancia parcial a

la sombra. **Considerando entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos, los frutales con mayor potencial según superficie total cultivada son el cerezo, el avellano y la vid de mesa con 66.958 [ha], 36.330 [ha] y 27.793 [ha] respectivamente**.

4.2.4. Analizar el diseño de un sistema Agrofotovoltaico específico con su respectivo análisis de costos

En primer lugar, se debe seleccionar el proyecto AgriPV específico, para lo cual se usarán los siguientes criterios de selección:

- Sistemas AgriPV de mediana capacidad (entre 2 a 4 [MWp] de potencia). Esto debido a que se posee información confidencial acerca de proyectos FV convencionales desarrollados en Chile de 3 [MWp] de potencia aproximadamente, así la comparación no sufriría de efectos de escala.
- El uso de paneles semi-transparentes, debido a las numerosas ventajas que ofrece esta tecnología y sus sinergias.
- Proyectos cuyo cultivo se desarrolle en Chile de manera activa.

Con esto en mente y con la información presente en la Tabla 3.2, se selecciona el proyecto **Piet Albers** al ser el proyecto que mejor reúne tanto los criterios de capacidad (aproximadamente 3 [MWp]), módulos FV (semi-transparentes) y cultivo que se desarrolla de manera activa en Chile (frambuesas).

Luego se debe realizar el análisis de diseño y de costos del proyecto. Para el análisis de diseño, se busca extrapolar el proyecto al entorno chileno y así analizar su viabilidad, de esta manera, se aborda el rubro FV y agrícola del AgriPV por separado. Para el rubro FV, se seleccionan las tres regiones más representativas del cultivo de frambuesa (Ñuble, Maule y La Araucanía, respectivamente) y se compara el potencial FV con la zona en que se emplaza el proyecto originalmente (Babberich, Países Bajos); esto se realiza con la herramienta Global Solar Atlas [20] la cual además de proveer el GHI, posee una métrica de Potencial FV que considera parámetros que afectan el rendimiento de un sistema FV. Respecto al rubro agrícola, se busca corroborar si el diseño AgriPV coincide con parámetros del cultivo de frambuesa existentes en Chile, también analizar si los beneficios agrícolas del sistema son relevantes para el contexto chileno o si se deben recomendar cambios en el sistema AgriPV para garantizar la protección frente a

climas adversos locales.

Para el análisis de costos, se utilizará información de una empresa confidencial que construye proyectos FV convencionales, comparando una línea base creada a partir de cinco proyectos reales (Base-PV) con una estimación de costos para AgriPV (Base-APV). Esta estimación se construirá a partir de Base-PV donde se modificará de forma porcentual solo las categorías con mayor impacto en la transición de FV convencional a AgriPV, las cuales son: servicios de ingeniería, módulos FV y subestructura, a fin de obtener una estimación acorde a la inversión necesaria para la construcción del sistema AgriPV. Además, debido a la incertidumbre en la estimación de Base-APV, se plantean cuatro casos de análisis de sensibilidad, variando las categorías modificadas en -25 %, -10 %, 10 % y 25 %. Por último, se realiza un último análisis de sensibilidad que varía los costos de la subestructura, asumiendo que este costo pudiese ser menor.

Análisis de diseño: extrapolar proyecto AgriPV Piet Albers a la realidad chilena

Los resultados FV de extrapolar el sistema a Chile se resumen en la Tabla 4.4, donde se puede observar un rango entre 34 % y 54 % de mayor generación eléctrica. Cabe destacar que esta comparación no toma en cuenta la disposición este/oeste del sistema que puede afectar la magnitud del potencial FV.

Para extrapolar el rubro agrícola, se estiman diversos parámetros constructivos del sistema con el fin de dimensionar y poder comparar con el marco de cultivo del frambueso. En la Figura 4.2 se puede observar la disposición en filas para el cultivo del frambueso, así como las distancias usadas para el cultivo de frambuesa en Chile. En la Figura 4.3 se puede observar que el proyecto Piet Albers posee la misma disposición de cultivo así como una distancia similar al marco de plantación, por lo que en primera instancia, es válido extrapolar el sistema AgriPV al contexto chileno. A continuación se analizan los beneficios agrícolas del proyecto Piet Albers y cómo estos pueden adaptarse al contexto chileno.

Tabla 4.4: Datos específicos FV del proyecto Piet Albers y de las regiones representativas del cultivo de frambuesa. Se incluye comparación porcentual de la Potencia FV específica por localidad, tomando a Babberich, Países Bajos como referencia. Datos obtenidos mediante Global Solar Atlas [20].

País	Región	Localidad	Irradiancia GHI [kWh/m2-año]	Potencia FV específica [kWh/kWp-año]	Comparativa de Potencia FV específica
NL	Gelderland	Babberich	1062,5	1062,7	0 %
CL	Maule	Linares	1825,4	1638,9	54 %
CL	Maule	Talca	1835,5	1620,5	52 %
CL	Maule	Curicó	1827,7	1603,1	51 %
CL	Ñuble	Diguillín	1796,9	1626,8	53 %
CL	Ñuble	Punilla	1815,6	1636,5	54 %
CL	La Araucanía	Cautín	1526,9	1418,9	34 %
CL	La Araucanía	Malleco	1617,9	1493,2	41 %



Figura 4.2: Marco general de plantación de frambueso en Chile, créditos a Marina Gambardella y a INDAP [17].

Para las altas temperaturas de verano, es sumamente relevante que el cultivo posea buena ventilación [11], para lo cual se debe garantizar que el agujero existente

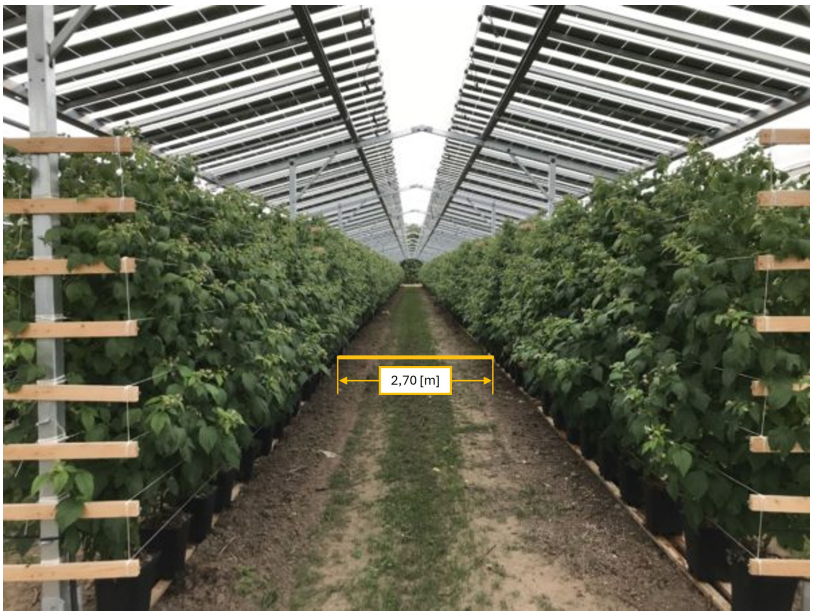


Figura 4.3: Distancia de paso estimada representada en el sistema AgriPV Piet Albers (Dentro de la estructura AgriPV) [15].

entre paneles permita la convección natural del aire de manera oportuna. Es así que se recomienda **aumentar la distancia de paso estimada dentro de la estructura FV**, de esta manera el agujero existente entre los paneles será más grande y así se garantizará una mejor ventilación del cultivo. Además, se recomienda **analizar la transmitancia de los paneles semi-transparentes** con el fin de que estos puedan ser usados para reemplazar las mallas de sombras en los cultivos. En el mejor de los casos, se puede disminuir la transmitancia de los módulos y así proteger en mayor manera al cultivo de la excesiva radiación solar, mientras que existe la posibilidad de generar mayor energía eléctrica.

En cuanto a las bajas temperaturas, estas traen fenómenos tales como el granizo y las precipitaciones las cuales pueden afectar la cosecha de otoño en variedades remontantes. Es por esto que se hace hincapié en **mantener los paneles con su funcionalidad de techo para que de esta manera puedan proteger al cultivo de las precipitaciones otoñales**. Otro fenómeno asociado a las bajas temperaturas son las heladas, donde el sistema puede generar una leve resiliencia manteniendo más constantes las temperaturas. No obstante, esto no suele representar una solución definitiva para estos problemas ya que los sistemas AgriPV amortiguan aproximadamente entre 1-2 [°C], por lo que se recomienda un sistema anexo que lidie con las heladas. Respecto a las horas frío que

debe adquirir la planta en invierno, es de suma importancia que el diseño AgriPV no impida al cultivo de adquirir dichas temperaturas (T°<7°), algo que debe ser crucial para que el sistema no represente efectos negativos a la hora de generar un ambiente más controlado para el frambueso.

Análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers

A continuación, a partir de Base-PV se realiza una estimación de los costos del proyecto AgriPV Piet Albers (Base-APV). Para esto se usarán cotizaciones de los años 2021/2022 [77], años similares a los proyectos de Base-PV. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Base-PV y Base-APV con su porcentaje de aumento a partir de Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	Base-APV [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.078**	**100 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**758.651**	**62 %**
Módulos FV	222.878	312.029	40 %
Subestructura (Trackers)	106.548	308.988	190 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-
Cables de Poder & Acc.	32.270	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**1.112.222**	**36 %**

A partir de la Tabla 4.5 se puede desprender que existe un aumento de costos del 36 % entre Base-PV y Base-APV. Esto se debe principalmente a los *Módulos FV* y la *Subestructura* con un aumento del 40 % y 190 % respectivamente.

Luego, se realizaron análisis de sensibilidad debido a que existe incertidumbre en los datos con los que se construyó Base-PV, así como en las variaciones mediante las que se estimó Base-APV. Es por esto que se generan cuatro casos de sensibilidad en los que se variará en -25 %, -10 %, 10 % hasta 25 % la estimación de Base-APV, dichas variaciones se llamarán VAR(*-25 %), VAR(*-10 %), VAR(*10 %) y VAR(*25 %) respectivamente.

Tabla 4.6: Casos de variación en la estimación de Base-APV en un -25 % (VAR(*-25 %)) y -10 % (VAR(*-10 %)), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR(*-25 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR(*-10 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**6.809**	**50 %**	**8.170**	**80 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**603.397**	**29 %**	**696.549**	**49 %**
Módulos FV	222.878	234.022	5 %	280.826	26 %
Subestructura (Trackers)	106.548	231.741	118 %	278.089	161 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**954.698**	**17 %**	**1.049.212**	**29 %**

En la Tabla 4.6 se presentan resultados para los intervalos más optimistas. En el caso VAR*(-25 %) se puede observar que a pesar de disminuir las estimaciones de Base-APV en -25 %, sigue existiendo un aumento en los costos de un 17 % (Respecto a Base-PV), el aumento se da principalmente por la diferencia de costos en la subestructura.

El caso de VAR*(-10 %), existe un aumento de costos del 29 %. Este aumento se da en primer lugar, por los costos de la subestructura y en segundo lugar, por los costos de los módulos FV.

Tabla 4.7: Casos de variación en la estimación de Base-APV en un 10 % (VAR(*10 %) y 25 % (VAR(*25 %), con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR(*10 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR(*25 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.986**	**120 %**	**11.348**	**150 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**820.753**	**76 %**	**913.905**	**96 %**
Módulos FV	222.878	343.232	54 %	390.036	75 %
Subestructura (Trackers)	106.548	339.887	219 %	386.235	263 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**1.175.231**	**44 %**	**1.269.745**	**56 %**

En la Tabla 4.7 se presentan resultados para los intervalos más pesimistas. En el caso VAR*(10 %) se puede observar que existe un aumento en los costos de un 44 %. Para caso de VAR*(25 %), existe un aumento de costos del 56 %. Ambos aumentos se dan en primer lugar, por los costos de la Subestructura y en segundo lugar, por los costos de los Módulos FV.

A partir de los resultados presentados, se observa un constante aumento de costos en las estimaciones a partir de los costos de la subestructura, seguido posteriormente por los módulos FV. Con esto en mente, se desarrollan dos nuevos casos de análisis de sensibilidad donde a la estimación Base-APV se le modifique sólo el ítem de subestructura, asumiendo que este costo pudiese ser menor. Estos casos se presentan en la Tabla 4.8.

En la Tabla 4.8 se observan casos más optimistas de costos al aumentar en un 50 % y 100 % el precio asociado a la subestructura y manteniendo el resto en la estimación realizada como Base-APV.

Tabla 4.8: Casos de variación en la estimación de Base-APV, sólo modificando la Subestructura en un 50 % (VAR(Substr.*50 %) y 100 % (VAR(Substr.*100 %)) de aumento respecto a Base-PV; todo esto con su respectivo porcentaje de aumento respecto a Base-PV.

Categoría	Base-PV [USD/MWp]	VAR (Substr.*50 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento	VAR (Substr.*100 %) [USD/MWp]	Porcentaje de aumento
Servicios de Ingeniería	**4.539**	**9.078**	**100 %**	**9.078**	**100 %**
Suministros & Equipamiento	**467.060**	**609.485**	**30 %**	**662.758**	**42 %**
Módulos FV	222.878	312.029	40 %	312.029	40 %
Subestructura (Trackers)	106.548	159.821	50 %	213.095	100 %
Inversor de corriente	24.367	24.367	-	24.367	-
Subestación	41.503	41.503	-	41.503	-
Monitoreo - SCADA	15.987	15.987	-	15.987	-
Cables de Poder & Accessorios	32.270	32.270	-	32.270	-
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	7.265	7.265	-	7.265	-
ESS & CCTV	16.243	16.243	-	16.243	-
Preparación del sitio	**13.555**	**13.555**	**-**	**13.555**	**-**
Cercado del sitio	11.795	11.795	-	11.795	-
Preparación del terreno - Externo	1.760	1.760	-	1.760	-
Trabajos de Construcción - Planta FV	**215.258**	**215.258**	**-**	**215.258**	**-**
Facilidades de sitio	12.606	12.606	-	12.606	-
Trabajos Civiles - Ext.	7.411	7.411	-	7.411	-
Trabajos Mecánicos - Ext.	190.337	190.337	-	190.337	-
Trabajos Eléctricos - Ext.	4.903	4.903	-	4.903	-
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**66.477**	**66.477**	**-**	**66.477**	**-**
Trabajos de Línea de Conexión	27.161	27.161	-	27.161	-
Refuerzos eléctricos	39.316	39.316	-	39.316	-
Otros Costos de Proyecto	**49.202**	**49.202**	**-**	**49.202**	**-**
Total	**816.091**	**963.055**	**18 %**	**1.016.329**	**25 %**

Estos nuevos casos de análisis de sensibilidad permiten apreciar el peso del aumento en el costo de la subestructura realizado en la estimación Base-APV. Se puede apreciar en la Tabla 4.8 que al aumentar un 50 % los costos de la Subestructura, los costos totales de un sistema AgriPV resultan un 18 % mayores que Base-PV. Así mismo, al aumentar un 100 % los costos de la Subestructura, los costos totales de un sistema AgriPV se pueden estimar un 25 % mayores que Base-PV.

Conclusiones

El sistema AgriPV Piet Albers, al ser extrapolado a regiones frambueseras de Chile, **muestra un potencial de generación eléctrica significativamente mayor** al experimentado en Babberich, Países Bajos. El incremento, estimado **entre un 34 % y un 54 %**, implica que Chile es un país más competitivo en el desarrollo de la FV que Países Bajos en materias de potencial FV.

En el ámbito agrícola, el uso de paneles semi-transparentes es esencial para garantizar beneficios. A partir del análisis, se concluye que **los paneles semi-transparentes**

pueden usarse como reemplazo para las mallas de sombra y granizo. Asimismo, contribuyen a disminuir la altura total de la subestructura debido a su capacidad de transmitir un porcentaje de la luz incidente y lograr ubicarse cercano a la altura máxima del cultivo. Por otro lado, **el uso de subestructura específica permite un sistema robusto de construcción con potencial para contribuir al desarrollo de cultivos**. En este caso, la subestructura se usa para mejorar la ventilación del cultivo (en conjunto de la orientación de los módulos FV), así como sus vigas se usan para reemplazar el sistema de soporte del frambueso.

Para extrapolar el sistema AgriPV Piet Albers a Chile, se recomienda particularmente:

- Aumentar la distancia de paso dentro de la estructura FV, mejorando la ventilación del cultivo en el contexto chileno.
- Analizar la transmitancia de los paneles semi-transparentes con el fin de que estos puedan ser usados para reemplazar las mallas de sombras en los cultivos.
- Mantener los paneles con su funcionalidad de techo para que de esta manera puedan proteger al cultivo de las precipitaciones otoñales y granizo.
- Usar macetas que coincidan con la construcción y hacer uso de las vigas del sistema AgriPV para hacer el sistema de sujeción del frambueso.

Por otro lado, los resultados del análisis de costos confirman que **un sistema AgriPV presenta una inversión inicial superior respecto a un proyecto FV convencional, con incrementos totales estimados de un 36 % para este caso de análisis**. A pesar de esto, **el sobrecosto tiene el potencial de ser compensado por los beneficios a largo plazo que AgriPV ofrece**. Dicho aumento se atribuye, principalmente, a la subestructura necesaria para elevar los paneles (alrededor de 200.000 [USD] adicionales) y, en menor medida, a la implementación de módulos semi-transparentes (90.000 [USD] aproximados). Con esto en mente, **otorgar mayores beneficios a la agricultura mediante AgriPV, implica una mayor inversión en sistemas con soporte elevado y altura libre, los cuales obligatoriamente tendrán un mayor costo en la subestructura**.

No obstante, la rentabilidad global depende del modelo de negocio adoptado: si una empresa EPC asume solo la construcción, sin involucrarse en la producción agrícola, los beneficios agrícolas no compensan totalmente el incremento en los costos; en

cambio, cuando la misma empresa participa también en la explotación frutícola, el sobrecosto puede considerarse una inversión rentable gracias a las ventajas agronómicas y ambientales del sistema. Por ello, la decisión de implementar AgriPV debe evaluar si el aumento en la inversión inicial se ve justificado por los beneficios productivos y económicos a largo plazo, determinando además quién asume la producción agrícola y cómo el sistema encaja en la estructura de cada proyecto.

Bibliografía

[1] BayWa AG. Europe's largest fruitvoltaic project. https://www.baywa.com/en/about/electricity-heating-mobility/europes-largest-fruitvoltaic-project.

[2] Ministerio del Medio Ambiente de Chile. Informe sobre la evolución del clima 2022, 2023.

[3] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2 (FONDAP 15110009). Simulaciones climáticas regionales. Proyecto 'Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad' mandatado por el Ministerio del Medio Ambiente, 2018.

[4] Meteo Chile. ¿por qué nos importa tanto el anticiclón del pacífico sur?, 2018.

[5] Diario Financiero. Crean sistema de alerta de olas de calor que busca prevenir la mortalidad, 2024.

[6] Erik Runkle. Interactions of light, co_2, and temperature on photosynthesis. *Greenhouse Products News*, page 1, 2015.

[7] Max Trommsdorff, Ipsa Sweta Dhal, Özal Emre Özdemir, Daniel Ketzer, Nora Weinberger, and Christine Rösch. Chapter 5 - agrivoltaics: solar power generation and food production. In Shiva Gorjian and Pietro Elia Campana, editors, *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, pages 159–210. Academic Press, 2022.

[8] BayWa r.e. Baywa r.e. commissions a 2.7 mw solar farm in sint-oedenrode, netherlands. https://benelux.baywa-re.com/en/solar-plants-in-benelux/sint-oedenrode. Fecha de acceso: 26 de abril de 2023.

[9] Sinovoltaics. Solar tracker: What is a solar tracker? how does it work?, n.d.

[10] ADEME, I Care & Consult, et al. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme. ADEME, 2021.

[11] GroenLeven. Groenleven | zonne-energie en zachtfruit - piet albers, 2021.

[12] GroenLeven. Agri-pv babberich, 2025.

[13] W. Loeffen, T. Ploeger, J. de Groot, L. Zuurbier, J. van den Heuvel, and K. Oostendorp. Bijlage 2 Ruimtelijke onderbouwing: Stevensbeek, Lactariaweg ong. Omgevingsvergunning. Technical report, Gemeente Sint Anthonis, 2020.

[14] GroenLeven. Groenleven | zonne-energie en zachtfruit: timelapse realisatie zonnebron piet albers in babberich, 2021.

[15] Environnement Magazine. Agrivoltaïsme : Baywa r.e. recherche des partenaires producteurs de fruits. *Environnement Magazine*, 2022.

[16] Sciences et Avenir. Aux pays-bas, à la recherche d'espace pour l'énergie solaire. *Sciences et Avenir*, 2022.

[17] INDAP. Poda de frambuesa - seminario virtual berries. Expositora: Marina Gambardella.

[18] Max Trommsdorff, Simon Gruber, Tobias Keinath, Michaela Hopf, Charis Hermann, Frederik Schönberger, Charlotte Gudat, Alexa Torres Boggio, Moritz Gajewski, Petra Högy, Sabine Zikeli, Andrea Ehmann, Axel Weselek, Ulrich Bodmer, Christine Rösch, Daniel Ketzer, Nora Weinberger, Stephan Schindele, and Jens Vollprecht. *Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, February 2024. A Guideline for Germany.

[19] Hadi A. AL-agele, Kyle Proctor, Ganti Murthy, and Chad Higgins. A case study of tomato (solanum lycopersicon var. legend) production and water productivity in agrivoltaic systems. *Sustainability*, 13(5):2850, 2021.

[20] Global Solar Atlas. Global Solar Atlas. `https://globalsolaratlas.info/map`, 2025.

[21] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Catastro de Superficie Frutícola Regional. https://reportes.odepa.gob.cl/#/catastro-superficie-fruticola-regional, 2025.

[22] David B. Lobell, Wolfram Schlenker, and Justin Costa-Roberts. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042):616–620, 2011.

[23] Joshua Elliott, Delphine Deryng, Christoph Müller, Katja Frieler, Markus Konzmann, Dieter Gerten, Michael Glotter, Martina Flörke, Yoshihide Wada, Neil Best, Stephanie Eisner, Balázs M. Fekete, Christian Folberth, Ian Foster, Simon N. Gosling, Ingjerd Haddeland, Nikolay Khabarov, Fulco Ludwig, Yoshimitsu Masaki, Stefan Olin, Cynthia Rosenzweig, Alex C. Ruane, Yusuke Satoh, Erwin Schmid, Tobias Stacke, Qiuhong Tang, and Dominik Wisser. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9):3239–3244, 2014.

[24] Wen Liu, Luqing Liu, Chenggang Guan, Fangxin Zhang, Ming Li, Hui Lv, Peijun Yao, and Jan Ingenhoff. A novel agricultural photovoltaic system based on solar spectrum separation. *Solar Energy*, 162:84–94, 2018.

[25] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. Agrophotovoltaics: Opportunities and challenges, 2018.

[26] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Informe a la nación: La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro, noviembre 2015.

[27] Raúl Cordero and Redacción Clarín. Registraron en chile la mayor radiación solar de la historia del planeta: es superior a la de venus. *Clarín Sociedad*, Jun 2023.

[28] Jorge Chazarra. Radiación solar en chile. Technical report, Instituto Antártico Chileno, 2017.

[29] Ministerio de Energía de Chile. Explorador solar. https://solar.minenergia.cl/exploracion, 2024.

[30] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Informe de seguridad hídrica en chile 2023, 2023.

[31] Encyclopædia Britannica. Photosynthesis: Basic products of photosynthesis, 2024. Accessed: 2024-05-27.

[32] Ron Mittler. Heat stress: response, mitigation, and implications. *Journal of Experimental Botany*, 72(21):7359–7367, November 2021.

[33] Muhammad Farooq, Saqib Hussain, Muhammad Adeel, Irfan Khan, Abdul Wahid, and Kadambot H. M. Siddique. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10(2):259, February 2021.

[34] David Moher and Michael Koutsos. Climate change impacts on temperate fruit and nut production: a systematic review. *Frontiers in Plant Science*, 12:658772, February 2021.

[35] R.S. LOOMIS and D.J. CONNOR. *Ecología de cultivos. Productividad y manejo en sistemas agrarios*. Ediciones Mundi-Prensa, 2002.

[36] Fraunhofer Chile. Aumento de la resiliencia de la agricultura en zonas semiáridas: Efectos del agro pv en el microclima de la horticultura. `https://www.fraunhofer.cl/content/dam/chile/es/media/Fraunhofer_Chile_2023_Agro_PV_Microclima.pdf`, 2023. Fecha de acceso: 23 de mayo de 2023.

[37] G.A. Barron-Gafford, M.A. Pavao-Zuckerman, R.L. Minor, et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2:848–855, 2019.

[38] Lloyd T. Evans. Physiology of crop plants: F.p. gardner, r.b. pearce and r.l. mitchell. iowa state university press. *Field Crops Research*, 14:299–300, 1986.

[39] Brian Thomas. Photoperiodism and flowering. *Journal of Experimental Botany*, 68(11):2757–2770, 2017.

[40] M. Abberton, J. Batley, A. Bentley, J. Bryant, H. Cai, J. Cockram, and et al. Global agricultural intensification during climate change: a role for genomics. *Plant Biotechnology Journal*, 14(4):1095–1098, 2016.

[41] Y. Elamri, B. Cheviron, J. M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208:440–453, 2018.

[42] Christian Dupraz. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforestry Systems*, 98:2679–2696, 09 2023.

[43] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). Informe sobre fotovoltaica. Technical report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), 2023.

[44] Lutz Breuer, Klaus Eckhardt, and Hans-Georg Frede. Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling*, 169(2):237–293, 2003.

[45] Jingjing Peng, Wenjie Fan, Xiru Xu, Lizhao Wang, Qinhuo Liu, Jvcai Li, and Peng Zhao. Estimating crop albedo in the application of a physical model based on the law of energy conservation and spectral invariants. *Remote Sensing*, 7(11):15536–15560, 2015.

[46] M. Hassanpour, M. Ashjaee, and M. Ameri. Performance assessment of semi-transparent photovoltaic modules integrated on greenhouse roof. *Applied Energy*, 224:527–538, 2018.

[47] S. Amaducci, X. Yin, and M. Colauzzi. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, 220:545–561, 2018.

[48] M. Trommsdorff et al. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140:110694, 2020.

[49] Pvinsights. Fecha de acceso: 3 de agosto de 2023.

[50] M. Heinrich, T.E. Kuhn, F. Dimroth, U. Würfel, J.C Goldschmidt, M. Powalla, S.W. Glunz, and D.H. Neuha. A comparison of different solar cell technologies for integrated photovoltaics. 2020.

[51] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability, 2022.

[52] Guillermo Donoso. Management of water resources in agriculture in chile and its challenges, 2022.

[53] Oscar Melo and William Foster. Agricultural and forestry land and labor use under long-term climate change in chile. *Atmosphere*, 12(3), 2021.

[54] Constanza I. Saa. Anteproyecto: Plan nacional de adaptación al cambio climático sector silvoagropecuario, December 2023.

[55] Coordinador Nacional Eléctrico (CNE). Balance ernc, 2024.

[56] ACERA A.G. Estadísticas sector de generación de energía eléctrica renovable, 2024.

[57] DIN SPEC 91434:2021-05. Agri-photovoltaic systems - requirements for primary agricultural use. Technical Rule DIN SPEC 91434, Deutsches Institut für Normung, 2021. PAS, Translations: French, Dutch, English, Spanish, Polish.

[58] Svenja Bartels and Anna Maria Desidera. Facts on agrivoltaics in italy – overview of a regulation in a flux, 2023. Fecha de Acceso: 27 de Abril de 2023.

[59] Emiliano Bellini. Japan releases new guidelines for agrivoltaics as installations hit 200 mw, December 2021.

[60] Freya Graham. Solar sharing helps farmers in japan adopt sustainable methods — and earn additional money, December 2022.

[61] E. Meijers and D. Stead. Agrivoltaics in japan: A legal framework analysis. In *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 2022. Accessed: 2024-09-08.

[62] Légifrance. Article legiarti000047298015 - code de l'urbanisme, 2023. Accessed: 2024-09-07.

[63] Anne Fischer. Us government allocates $8 million to support agrivoltaics. *PV Magazine International*, 2022.

[64] Solarize USA. Agri-pv: The intersection of agriculture and solar power in the u.s. *Solarize Blog*, 2023.

[65] Alexis S. Pascaris, Chelsea Schelly, and Joshua M. Pearce. A first investigation of agriculture sector perspectives on the opportunities and barriers for agrivoltaics. *Agronomy*, 10(12):1885, 2020.

[66] Emiliano Bellini. Giant agrivoltaic project in china. *PV Magazine International*, 2020.

[67] World Resources Institute. Agrivoltaics boosts food and energy production in asia. https://www.wri.org/insights/agrivoltaics-boosts-food-and-energy-production-asia, 2024.

[68] Vincent Shaw. Chinese pv industry brief: Nea moves forward with curtailment plan. *PV Magazine International*, 2024.

[69] International Energy Agency. Renewable energy law of the people's republic of china. *International Energy Agency*, 2021.

[70] A. Chatzipanagi, N. Taylor, and A. Jaeger-Waldau. Overview of the potential and challenges for agri-photovoltaics in the european union. Technical report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.

[71] Agrisolar. Croatia takes a leap for agrisolar. *Power Solar Europe*, 2023.

[72] Herman Helsen, Bernardo Maestrini, Eva Meijers, Marleen Hermelink, Willem de Vries, Peter Balk, and Frank de Ruijter. Crop response to agrivoltaics in soft fruit production. Technical report, Wageningen University & Research, 2022.

[73] Max Tegtmeyer. Agri-photovoltaics (agri-pv) from baywa r.e. https://www.ises.org/sites/default/files/webinars/ISES%20%2B%20GSC%20AgriPV%20Webinar_Presentation%20Max%20Tegtmeyer.pdf, 2022. Webinar presentation from ISES GSC, 2022.

[74] Global Solar Atlas. Global Solar Atlas - Methodology. https://globalsolaratlas.info/support/methodology, 2025.

[75] CIREN. Frambuesa. Informe, CIREN, December 2017.

[76] Carmen Gloria A. Morales, Alberto Pedreros, Jorge Riquelme, Hamil Uribe, Juan Hirzel, Patricio Abarca, and Andrés France. Manual de manejo agronómico del frambueso. Technical report, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile, 2017. Boletín INIA Nº 372.

[77] Frederik Schönberger. Business models in the distributed generation segment for agrivoltaics in chile - merging business cases for farmers and pv investors. Master's thesis, Albert-Ludwigs University of Freiburg, Santiago, Chile, June 2022.

[78] Diego Arribillaga García and Carolina Mujica Vargas. El cultivo del cerezo en chile, zona central vs patagonia. In *Actas del Primer Simposio Internacional del Cultivo del Cerezo en la Patagonia Occidental*, pages 77–84, 2000.

[79] Pablo Grau B. *Avellano Europeo: Manual de Plantación y Manejo*. Number 108 in Boletín INIA. Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile, 2023.

[80] Andrea Torres P., editor. *Manual de Producción de Uva de Mesa*. Number 383 in Boletín INIA. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile, 2017.

[81] Rafael Bianchini Jessica Millar, editor. *Manual de manejos productivos del nogal en Chile*. Chilenut, Santiago, Chile, 2010. Este manual es resultado de un trabajo desarrollado por la Asociación Gremial de Productores y Exportadores de Nueces, ChileNut, y cofinanciado por la Corporación de Fomento de la Producción, CORFO, con el objetivo de apoyar el emprendimiento, la innovación y la competitividad en el país, junto con fortalecer el capital humano y las capacidades tecnológicas.

[82] Gamalier Lemus S., Raúl Ferreyra E., Pilar Gil M., Paulina Sepúlveda R., Patricio Maldonado B., Carlos Toledo G., Cristián Barrera M., and José Miguel Celedón de A. *El cultivo del palto*. Number 129 in Boletín INIA. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile, 2010.

[83] Revista Frutícola. Plantaciones intensivas de manzano en muro frutal. *Revista Frutícola*, 2017.

[84] Marcelo Zolezzi V., Patricio Abarca R., Carmen Gloria Morales A., Abel González G., Jorge Riquelme S., Juan Hirzel C., Andrés France I., Alberto Pedreros L., Hamil Uribe C., Bruno Defilippi B., Paula Robledo M., and Cecilia Becerra C. *Manual de manejo agronómico del arándano*. Number 371 in Boletín INIA. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Santiago, Chile, 2017.

[85] Alejandro Antúnez Barría, Paula Riquelme Salinas, and Alexis Pérez Rios. Huella hídrica en ciruela. In *Determinación de la huella del agua y estrategias de manejo de recursos hídricos*, pages 107–110. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 2012.

[86] Antonio Ibacache González. *Manual de producción de cítricos*. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile, 1998.

[87] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). *Manual de manejo de huerto de olivo*. INIA, Santiago, Chile, 2017.

[88] Agricola Cran Chile. Conoce a agricola cran chile, 2024.

Anexo A

Revisión de políticas internacionales y recomendaciones para la implementación de la agrivoltaica en Chile

Revisión de políticas y regulaciones internacionales: Francia

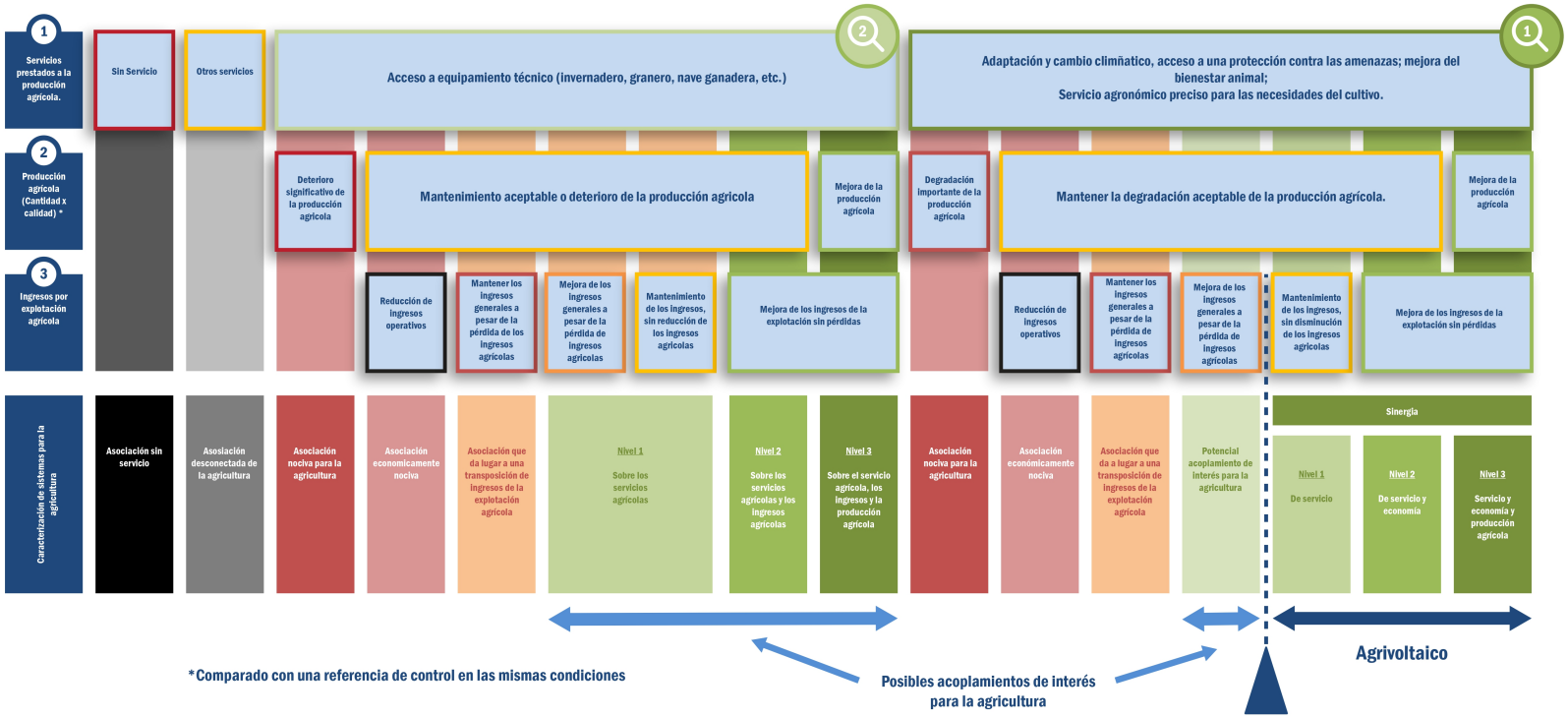


Figura A.1: Gradiente de clasificación de proyectos FV en suelo agrícola, traducido de ADEME.

ENERGY PARTNERSHIP
CHILE-ALEMANIA

AgriPV: Uso compartido de suelos para la agricultura y generación de energía solar fotovoltaica

Solución integral para abordar los retos intersectoriales asociados al cambio climático, con énfasis en la seguridad alimentaria, hídrica y el apoyo a la transición energética.
Enero *2025*



AgriPV: Uso compartido de suelos para la agricultura y generación de energía solar fotovoltaica

Impreso

3ra Edición, enero 2025: Energy Partnership Chile- Alemania
Comisionado y publicado por: Deutsche
Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GIZ
Dirección: Marchant Pereira 150, Providencia, Santiago de Chile
E-mail y página web: energyclde@giz.de /
www.energypartnership.cl

Autores: Duran, Gabriel ; Osses, Mauricio (Universidad Técnica Federico Santa Maria) ; Schmidt, Michael (GIZ Chile) ; Schönberger, Frederik (Fraunhofer Chile Research)

Muchas gracias por la ayuda con la elaboración y la revisión a: José Barraza Molina (CR2) ; Bastián C. Huaiquilaf / Gerson R. Victoriano (Comisión Nacional de Riego) ; Frank Dinter (Fraunhofer Chile) ; Ignacio Barraza / Pablo Thomas (O'Energy) ; Daina Neddemeyer / Franz Konrad / Diego Messina / Ursula Richter / Sandra Perez Valenzuela / Veronica Vukasovic / Daniel Garrido / Maximiliano Rodriguez (GIZ) ; Marcia Montedonico / Rodrigo Palmer (Universidad de Chile) ; Ivan Poklepovic / Rodrigo Ropert (Aninat); Ximena Ubilla Alvarez (Ministerio de Energía)

Diseño: Sofía Ceballos Jofré
Basado en: dena 2024. "Internationale Kommunikation der Energiewende in der bilateralen Zusammenarbeit. Gestaltungsrichtlinien"

Fotografía e ilustraciones:
© Nombrado en el texto.
Portada © BMWK

Socios:

Ministerio Federal de Economía y Protección del Clima

Ministerio de Energía
Gobierno de Chile

ENERGY PARTNERSHIP
CHILE-ALEMANIA

Institución ejecutora:

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

En colaboración con:

Fraunhofer CHILE

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Resumen Ejecutivo

La variabilidad climática afecta la producción agrícola de Chile, especialmente en las regiones donde la disponibilidad de agua es crítica. Para abordar estas vulnerabilidades, es fundamental implementar medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático. En este contexto, los sistemas agrivoltaicos o AgriPV son una innovadora combinación de agricultura y energía solar fotovoltaica que permite abordar los retos intersectoriales asociados al cambio climático en el país.

Esta tecnología consiste en la instalación de paneles solares en superficies utilizadas para la agricultura, lo que promueve la seguridad alimentaria e hídrica, la resiliencia climática y la micro generación eléctrica distribuida. Junto con lo anterior, genera energía cerca de o en los puntos de demanda, y proporciona sombra y protección a los cultivos intensivos y frutales contra la evapotranspiración, el granizo y las heladas.

Este documento destaca la importancia de esta innovadora tecnología y propone recomendaciones de políticas concretas para fomentar su uso en Chile, incluyendo aspectos legales, financieros y colaborativos, como:

- Adecuar el marco regulatorio chileno que permita definir el AgriPV y abordar la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola, tomando como ejemplo la normativa internacional.
- Considerar el AgriPV en convocatorias de I+D+i y fondos nacionales gestionados por entidades como Ministerio de Agricultura, Ministerio de Energía para acelerar el desarrollo de soluciones AgriPV adaptadas al contexto local.
- Formar una mesa de trabajo con actores multidisciplinarios, incluyendo al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Riego y entidades de investigación, para abordar cuestiones normativas y aprovechar los beneficios socioeconómicos de la tecnología AgriPV de manera controlada con una mirada al largo plazo.

Recomendaciones para la regulación e implementación del AgriPV en Chile. (véase capítulo 4)

Eje de acción	Recomendaciones
Marco jurídico	Elaborar una diferenciación formal jurídicamente vinculante entre el AgriPV y la FV convencional basándose en las definiciones internacionales.
	Incorporar en la normativa ambiental aplicable la definición de AgriPV para mantener el uso de suelo y así dar continuidad de la utilización agrícola.
	Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola.
	Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV.
Incentivos financieros	Considerar al Agri PV como una tecnología que permita generar un impacto positivo en la eficiencia hídrica.
	Establecer concursos de innovación de AgriPV que permitan monetizar las sinergias de la tecnología.
Red de actores	Crear una mesa de trabajo AgriPV con servicios públicos con competencias ambientales, industria y academia basada en la experiencia internacional.
	Considerar el AgriPV en convocatorias de I+D+i
	Intensificar la sensibilización y educación de la tecnología entre sus posibles usuarios.

1. AgriPV: concepto de uso dual de la tierra

Los sistemas AgriPV son diseñados para ser instalados en superficies con producción agrícola sin perjuicio de las tareas que esta conlleva.

El objetivo principal de estos sistemas es aumentar la resiliencia de los productores y sus cultivos ante el cambio climático, disminuir el consumo de agua de riego y usar de manera más eficiente la superficie cultivada al generar energía.

Entre los paneles fotovoltaicos (FV) y los cultivos agrícolas se generan condiciones atmosféricas específicas denominadas "microclima", por lo que la idea central al diseñar sistemas AgriPV es que puedan crear un microclima favorable con tal de satisfacer las necesidades de un cultivo en específico (Trommsdorff et al., 2024).

En este sentido, el diseño de un sistema AgriPV debe estar enfocado principalmente en la agricultura, con un rol secundario en la generación de energía.



Figura 1: Instalación de AgriPV con módulos semitransparentes sobre huertos de manzanos, parte del proyecto de investigación "Región Modelo de Baden-Wurtemberg", Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (s.f.). En este proyecto se investiga integralmente el potencial de la AgriPV en el sur de Alemania mediante la implementación de una variedad de proyectos piloto.



Figura 2: Sistema AgriPV con módulos monofaciales y altura libre desarrollado en el proyecto FIC-R 2015 CÓDIGO BIP 30449383-0 por Fraunhofer Chile Research. En el proyecto, financiado por el Gobierno Regional Metropolitano de Santiago, se implementaron tres proyectos piloto en colaboración con agricultores del sector de la horticultura en Lampa, Curacaví y El Monte (Fraunhofer Chile Research, 2018).

Siguiendo con el concepto de microclima, el efecto de la sombra de los paneles FV reduce la temperatura debajo de estos, disminuyendo tanto la evaporación del agua presente en el suelo, como la evapotranspiración en los cultivos, lo que permite disminuir el consumo de agua de riego (Trommsdorff et al., 2024). En un país como Chile esto es de suma importancia, en especial en el contexto de una megasequía como la vivida entre los años 2010 y el 2022 en la zona centro del país, y que se espera vuelva a producirse según simulaciones y proyecciones climáticas (Rojas et al., 2018).

En general, se puede observar que los sistemas AgriPV poseen diseños adaptados a los cultivos. En las Figuras 1 y 2 se aprecia un ejemplo de sistema denominado con altura libre de los paneles FV, con tal de generar un microclima específico y proteger a los árboles de granizo y lluvias intensas. Por otro lado, existe el diseño del sistema entre hileras, permitiendo el uso de maquinaria agrícola entre los paneles FV. La Figura 3 presenta un sistema AgriPV vertical, que habilita la producción y cosecha de heno entre las hileras de paneles.



Figura 3: Sistema AgriPV comercial con módulos bifaciales y en disposición vertical de 4,1 MWp de la empresa Next2Sun GmbH en Donaueschingen, Alemania, combinado con la producción de heno (Enkhardt et al., 2020).

1.1 ¿Qué desarrollos se han hecho hasta ahora a nivel internacional y en Chile?

A nivel global, varios países han desarrollado sistemas de investigación y explotación comercial del sistema AgriPV. La capacidad instalada en todo el mundo se estima en 14 GWp en 2021. El mayor sistema AgriPV del planeta se encuentra en China, donde se cultivan bayas bajo paneles solares con una capacidad de 700 MWp en el borde del desierto de Gobi, lo que también ayuda a frenar su avance hacia el país asiático y la consiguiente desertificación. En Asia, Japón y Corea del Sur también han adoptado la AgriPV, aunque en menor escala. Japón cuenta con más de 3.000 sistemas instalados. En Corea del Sur, el gobierno tiene planes de implementar 100.000 sistemas AgriPV en las granjas, en respuesta al éxodo rural. Este plan no solo ofrecerá a los agricultores un ingreso mensual de aproximadamente 1.000 dólares a través de la venta de electricidad, sino que también ayudará a prevenir la desaparición de las granjas (Trommsdorff et al., 2024).

En Europa, uno de los mayores sistemas AgriPV es un proyecto comercial en Alemania que cuenta con paneles verticales de 4,1 MWp del proveedor tecnológico Next2Sun GmbH (Enkhardt et al., 2020). En este sistema se cultiva heno y ensilado, demostrando la madurez tecnológica del enfoque para la aplicación en estos sectores agrícolas. En Francia, la empresa Sun'Agri implementa sistemas AgriPV sobre vides y frutales a nivel comercial (Sun'Agri, 2024). En tanto, en economías emergentes como India, la instalación de estos sistemas va en aumento, según un estudio del Indo-German Energy Forum (IGEF), que documenta sistemas de hasta 7 MWp (Rahman et al., 2023).

Para una visión del estado actual del desarrollo, la organización SolarPower Europe (2024) dispone de un mapa que documenta de forma interactiva más de 200 plantas en Europa, mientras que el proyecto InSpire (2024), de Estados Unidos, muestra los proyectos que se están desarrollando actualmente en los Estados Unidos.

En Chile (Figura 4), las primeras investigaciones con la tecnología AgriPV se llevaron a cabo por la Universidad de O'Higgins, la Universidad de Chile y Fraunhofer Chile Research, entre los años 2017 y 2020 (Reporte Sostenible, 2019; Zamorano et al., 2021; Fraunhofer Chile Research, s.f.). Actualmente, en 2024, la Universidad Adventista de Chile ha puesto en marcha un piloto en plantaciones de cerezos. En tanto, la Universidad de Chile está desarrollando dos sistemas en las regiones de Coquimbo y del Maule. Por otra parte, la empresa O'Energy puso en marcha el proyecto "Ayla Solar" con una capacidad total de 9 MWp conectados a la red, cerca de la ciudad Rancagua (O'Energy, 2023). Este es el primer proyecto comercial del sistema AgriPV en el país, y subraya el creciente reconocimiento y potencial de esta tecnología en Chile.

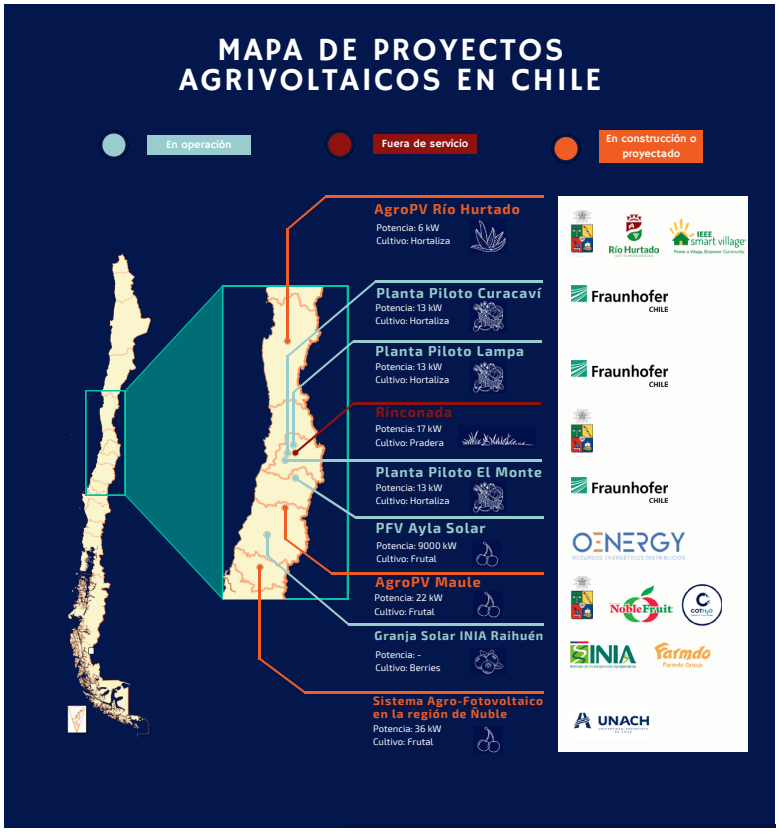


Figura 4: Mapa de proyectos implementados y en desarrollo según Giovanni Benedetto, Centro de Energía Universidad de Chile, julio 2024. Inédito.

2. Desafíos para la producción agrícola y generación de energía en un contexto de cambio climático

El cambio climático presenta eventos que generan impactos negativos para la agricultura, la seguridad alimentaria, la generación de energía y la estabilidad de los ecosistemas. La siguiente sección se enfoca en analizar los desafíos sobre el sector agrícola y sector de energía, y los desafíos para la implementación de sistemas AgriPV en Chile.

2.1 Desafíos del sector agrícola

Chile es uno de los países más vulnerables frente al cambio climático y fue categorizado como el primer país de América Latina con alto estrés hídrico (IPCC, 2022). Entre los años 2017 y 2022 se ha presentado un déficit de precipitaciones superior al 20% (Reinaldo et al., 2023), empeorando las consecuencias de la megasequía (Garreaud et al., 2015, 2017). El 2022 fue el decimotercer año consecutivo por debajo del promedio histórico de precipitaciones y como resultado, gran parte de las regiones del centro de Chile están en crisis hídrica.

Este periodo se superpone y acentúa una tendencia hacia un clima más seco observado desde la región de Coquimbo hasta la región de Aysén (Álvarez-Garretón et al., 2023). En un caso pesimista y según proyecciones climáticas, el déficit de precipitaciones de la zona central puede llegar a superar el 30%, es decir, una condición similar a la megasequía, pero en régimen permanente. Este régimen representa una condición promedio y anticipa la ocurrencia de años aún más secos debido a la variabilidad natural del clima en la zona (Álvarez-Garretón et al., 2023). Todo esto se traduce en una menor disponibilidad del recurso hídrico para el futuro.

Ahora bien, las actividades agrícolas y ganaderas representan un 75% de las extracciones consuntivas de agua en Chile, con un uso máximo en el verano (Álvarez-Garretón et al., 2023). Por otro lado, la demanda de agua en la zona centro-norte del país ha ido en aumento, mientras que la disponibilidad hídrica muestra una tendencia negativa en el tiempo (Álvarez-Garretón et al., 2023; Zambrano et al., 2024), esto supone un escenario insostenible a largo plazo.

A nivel de eficiencia del recurso hídrico, en 2021 la productividad económica del agua de la agricultura chilena fue de 0,52 USD por m^3, comparada con una media de 1,01 USD por m^3 en América Latina en 2019 (Donoso et al., 2021), lo que subraya la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso del agua en el país. Además de la escasez de agua, eventos climáticos como granizo, lluvias torrenciales y olas de calor afectan la producción de alimentos, heladas, mermando rendimientos o incluso, provocando pérdidas totales de los cultivos.

La combinación de estos factores climáticos y económicos demuestra la necesidad de adaptación y mitigación en este rubro. Las empresas agrícolas de mayor tamaño ya están adaptándose, por ejemplo, instalando mallas protectoras o reubicando cultivos hacia regiones más favorables para preservar la productividad a largo plazo (Melo et al., 2021). Sin embargo, cambiar el lugar de producción no es una alternativa para los pequeños agricultores (Saa Isamit et al., 2023), los cuales deben buscar otras estrategias para enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

2.2 Desafíos del sector energético en la transición energética

Desde el año 2010, Chile ha logrado avances significativos a través de la expansión de tecnologías de generación de energía renovable. Durante el primer semestre de 2024, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) constituyeron el 40,6% de la generación eléctrica del país (Coordinador Eléctrico Nacional, 2024). A pesar de estos avances, el rápido crecimiento ha excedido con creces la capacidad de las redes de transmisión existentes, lo que ha llevado a que altas tasas de energía renovable no puedan ser inyectadas a la red (vertimiento). En promedio, el vertimiento de energías renovables entre abril del 2023 y abril del 2024 fue de un 13,5% de la generación (ACERA, 2024). Por lo tanto, uno de los desafíos es acercar las zonas de generación a las de consumo, especialmente en la región centro-sur y centro-norte de Chile.

Los grandes sistemas FV (Utility) representan la gran mayoría de la capacidad ERNC instalada en Chile, sin embargo, sigue existiendo potencial de expansión en el segmento del autoconsumo (Net Billing), así como en los Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD). Ya existen modelos de negocio en el segmento Net Billing

sobre cómo una energía solar barata y limpia puede ahorrar dinero a los agricultores en su suministro eléctrico, donde dicho potencial se puede materializar a través de la AgriPV en terrenos agrícolas. Para suministrar energía a la red distribuida son clave los sistemas mas PMGD. Unos de los desafíos centrales consisten en ubicarse cerca de la infraestructura eléctrica existente, lo que dificulta la disponibilidad de terrenos adecuados para su desarrollo.

2.3 Desafíos para los sistemas AgriPV

En el contexto de la implementación y comercialización del AgriPV en Chile, se han identificado retos a nivel económico, legislativo, de investigación y social.

Un desafío crucial es el costo elevado de la inversión inicial como resultado de la necesidad de adaptar los sistemas AgriPV a la agricultura, teniendo en cuenta parámetros como la luz requerida por los cultivos, la geometría de estos y la maquinaria agrícola. Estas adaptaciones pueden incrementar los costos de inversión y disminuir la generación eléctrica. A la vez, monetizar los efectos sinérgicos como la conservación de tierras agrícolas y la reducción en el uso de agua y plásticos es complejo, requiere de nuevos modelos de negocio. En Chile aún faltan mecanismos específicos en el mercado que compensen estos costos adicionales con las sinergias generadas.

Por otro lado, no existe una diferenciación legal entre los sistemas FV convencionales y el AgriPV, lo que complica la creación de un marco legal jurídico que facilite su comercialización y brinde seguridad a los inversionistas. En esta línea, la legislación actual sobre uso de suelo limita el desarrollo de proyectos AgriPV a gran escala en áreas agrícolas, al clasificar los terrenos en categorías específicas y exigir medidas ambientales adecuadas para instalar paneles solares, incluso compatibles con la agricultura. Esto restringe su uso e impide aprovechar el potencial para la generación de energía limpia. Además, la actividad agrícola en los sistemas AgriPV es un reto normativo adicional, ya que el uso de la tierra para la generación de electricidad podría incentivar a los agricultores a priorizar la energía sobre la agricultura, sin incentivos adecuados para mantener ambas actividades.

El impulsar la comercialización del AgriPV en Chile implica fundamentalmente integrar disciplinas como la agronomía, el rubro FV, las ciencias sociales, económicas y medioambientales. Un enfoque inter y multidisciplinario es clave para diseñar sistemas que satisfagan las necesidades agrícolas locales y aborden desafíos energéticos específicos, considerando aspectos como el impacto del sombreado en los rendimientos agrícolas, la eficiencia hídrica y el impacto al suelo. Dicho esto, aunque el desarrollo global de AgriPV genera resultados prometedores, su adaptación a nivel local requiere la implementación de proyectos piloto y la validación del concepto en condiciones climáticas específicas junto con diferentes tipos de cultivos. Hasta la fecha, en Chile existe un bajo nivel de investigación en este aspecto, en especial en materia de rendimiento de cultivos.

Finalmente, el desafío social incluye una asimetría de conocimientos y capacidad financiera entre los agentes de los sectores FV y agrícola. Dependiendo del modelo empresarial, los pequeños y medianos agricultores pueden correr el riesgo de suscribir contratos desfavorables por desconocimiento. Además, se pueden generar expectativas desmedidas respecto del valor potencial del terreno, ya que muchos productores no están familiarizados con la solución debido a la ausencia de modelos de negocios. Esta barrera subraya la necesidad de educar sobre la integración de la FV en la agricultura para demostrar los beneficios mutuos y así construir una base sólida de confianza en base de nuevos modelos de negocio entre los diversos actores implicados.

3. AgriPV: oportunidad para la adaptación del sector agrícola en el proceso de transición energética justa

El enfoque AgriPV representa una solución innovadora ante los retos intersectoriales presentados anteriormente. Con esta tecnología se pueden abordar, simultáneamente, desafíos críticos como la seguridad hídrica, la seguridad alimentaria, la resiliencia climática y la microgeneración eléctrica distribuida, donde los beneficios del AgriPV se alinean con los principios de la Ley 21.455, Ley Marco de Cambio Climático. De esta manera, un enfoque AgriPV promueve el desarrollo sostenible del sector agrícola a través de la integración de proyectos FV en el mismo terreno.

3.1 Beneficios agrícolas

Los beneficios agrícolas que ofrece esta tecnología están dados principalmente por la creación de un microclima debido a la presencia de paneles solares. Un caso de estudio con tomates en sistemas AgriPV en Estados Unidos muestra que la sombra que generan los paneles mejora la eficiencia hídrica en los cultivos, aunque esto también podría reducir el rendimiento de los cultivos que requieran de más luz (Al-agele et al., 2021). Un estudio en Alemania (Trommsdorff et al., 2024) comparó cultivos situados bajo paneles solares y otros en un campo abierto, señalando que las variaciones de los rendimientos en sistemas AgriPV dependen en gran medida de las condiciones climáticas, por ejemplo, las papas variaron de un 20% menos en 2017 a un 11% más en 2018, un año caracterizado por ser seco y caliente, sugiriendo que el AgriPV podría ser beneficioso en condiciones de sequía, ya que reduce la evaporación y protege contra la radiación solar intensa. A continuación se presenta la Tabla 1, en la cual se detallan especificaciones y calidad de cosecha para cultivos de la fruticultura.

Por otro lado, en Chile central se realizaron tres proyectos piloto AgriPV de investigación (Fraunhofer Chile Research, 2018), los cuales compararon la eficiencia hídrica entre cultivos bajo el sistema AgriPV y a campo abierto. Los resultados arrojaron que en verano del 2021 se midió una media del 29% más de humedad del suelo bajo los paneles en comparación con la zona abierta. El sombreado del sistema AgriPV redujo la irradiación solar y la temperatura del suelo, lo que tiene el potencial de crear un entorno más controlado para los cultivos y, por tanto, influir positivamente en la productividad de la tierra (Jung et al., 2024), especialmente considerando que el AgriPV presenta mayores beneficios en climas semiáridos (Barron-Gafford et al., 2019) comparables a los de la zona centro-norte de Chile.

Tabla 1: Comparativa de resultados de cantidad y calidad de cosecha para distintos cultivos relacionados a la fruticultura.

Cultivo de frutas	Ubicación	Tipo de estructura	Tipo de panel	Tasa de sombra (%)	Cantidad de cosecha	Calidad de cosecha	Fuente
Frambuesa	Francia	Seguimiento horizontal de un eje	Opaco	n/d	Aumento de 24%	Frutas más grandes, cumplimiento con requisitos de azúcar y acidez	Juillion et al, 2024a
Manzana	Francia	Fijo inclinado de doble cara	Opaco	42%	Reducción de 27 - 32%	Se alcanza la norma mínima, pero la concentración de azúcar es inferior	Juillion et al., 2022; Juillion et al, 2024b
Pera	Bélgica	Fijo inclinado	Semitranspa-rente	35%	Reducción de 16%	Calidad similar	Willockx et al., 2024
Uva	Corea del Sur	Fijo inclinado	Opaco	<30%	No impacto significativo	No afectó el contenido de azúcar ni antocianinas, retraso en la coloración de la piel	Ahn et al., 2022
Kiwi	China	Fijo inclinado	Semitranspa-rente	19 - 38%	Reducción notable	Reducción del volumen de la fruta	Jiang etal., 2022
Cranberry	EE.UU	Fijo	Hoja de contrachapado	29,3 – 41,5%	Reducción significativa	Reducción significativa de la firmeza de la fruta y sólidos solubles totales, color de la piel no afectado	Mupambi et al., 2022

AgriPV presenta mayores beneficios en climas semiáridos (Barron-Gafford et al., 2019) comparables a los de la zona centro-norte de Chile. Ante esto último, sumado a los positivos resultados de los pilotos, se puede desprender que Chile posee una gran oportunidad para el desarrollo de esta tecnología, pudiendo proteger a los cultivos de las olas de calor, de la radiación solar directa y el estrés hídrico. En tanto, durante el invierno, los sistemas poseen el potencial para proteger a los cultivos de granizos y heladas. Por lo tanto, la implementación de sistemas AgriPV puede aumentar la resiliencia climática y la seguridad hídrica de cultivos durante todo el año.

Para evaluar el alcance de esta tecnología, el centro de investigación Fraunhofer Chile ha estimado preliminarmente que solo los huertos de arándanos tienen un potencial teórico de 13,4 GWp, lo que demuestra capacidad de los sistemas AgriPV de contribuir a la descentralización y descarbonización de la matriz eléctrica nacional. De hecho, si solo se consideran los huertos de arándanos se podría proporcionar energía equivalente al 22% de la generación eléctrica nacional del año 2023, al tiempo que reduciría la demanda de riego en casi 18 millones de m^3 al año debido al sombreado generado por los paneles (Jung et al., 2024). En cambio, la actual capacidad FV de Chile para abril de 2024 recién superó los 10 GWp (ACERA, 2024).

3.2 Beneficios energéticos y socioeconómicos

3.2.1 Beneficios energéticos

La tecnología AgriPV promueve la creación de nuevos puntos de conexión a la red y la generación eléctrica distribuida, lo que refuerza la generación de electricidad cerca del consumidor junto al aumento de la resiliencia energética en todos los segmentos (Net Billing, PMGD y Utility).

Además, ofrece una respuesta efectiva a los desafíos asociados con las limitaciones de espacio, especialmente en zonas donde el desarrollo de proyectos energéticos convencionales en terrenos agrícolas está restringido. Al desarrollar sistemas AgriPV en los segmentos PMGD y Utility en terrenos agrícolas cercanos a subestaciones, se pueden reducir significativamente los costos de conexión a la red, facilitando así la expansión de la infraestructura eléctrica de manera sostenible y eficiente, causando un impacto real en materias de transición energética.

3.2.2 Beneficios socioeconómicos

La implementación de proyectos de ERNC en áreas agrícolas (dependiendo del tipo de proyecto) puede desencadenar conflictos por el uso del suelo y generar impactos sociales, lo que altera la vida comunitaria rural. Por lo tanto, la idea es que los proyectos a implementar en áreas tradicionalmente agrícolas permitan la mantención de estas actividades y ofrezcan nuevas oportunidades de crecimiento socioeconómico.

Al abarcar los rubros agrícola y energético en conjunto, el sistema AgriPV potencia la convivencia de ambos mundos y consigue así beneficios sociales. Con esta tecnología se puede incentivar el trabajo local para la mantención de cultivos y el sistema FV, por lo que no se pierden empleos y se contribuye a mayores oportunidades de crecimiento social y económico en la zona. Estudios realizados en Alemania y Estados Unidos demuestran que las aplicaciones de estos proyectos pueden tener una percepción positiva y una mayor aceptación que los proyectos FV convencionales (Pascaris et al., 2022; Schrötter et al., 2023).

Tabla 2: Configuración de distintos modelos de negocio AgriPV (adaptado de Trommsdorff, 2024).

Modelo de negocio (punto de vista del agricultor)	Función			
	Proveer terreno	Gestión agrícola	Proveer Sistema FV	Operar Sistema FV
1. Todas las Funciones	Agricultor			
2. Propietario de Terreno Externo	Propietario terreno	Agricultor		
3. Inversión Externa en FV	Agricultor		Inversores FV	Agricultor / Operador FV
4. Sólo Gestión Agrícola y Operación FV	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Agricultor
5. Sólo Gestión Agrícola	Propietario terreno	Agricultor	Inversores FV	Operador FV

Por otro lado, los modelos de negocio asociados al AgriPV suelen ser más complejos que los sistemas FV convencionales debido a que se incorporan terrenos agrícolas a la ecuación. A pesar de ello, son factibles y, dependiendo del caso, permiten generar distintos beneficios económicos para el sector agrícola. Con respecto a las partes involucradas, su implementación puede requerir la participación de diferentes actores o áreas de responsabilidad con funciones variadas como ilustra la Tabla 2.

En el modelo de negocio más sencillo (1. Todas las Funciones), las cuatro áreas pueden ser gestionadas por una sola parte, normalmente una empresa agrícola. Este modelo se puede utilizar sobre todo en pequeñas instalaciones bajo el esquema Net Billing con el beneficio principal de disminuir la cuenta eléctrica junto con los efectos sinérgicos para la agricultura. En el caso de que la tierra no sea propiedad de la propia empresa agrícola (2. Propietario de Terreno Externo), la empresa agrícola o el agricultor puede obtener los mismos beneficios que en el Caso Base, pero los contratos de arrendamiento a largo plazo de hasta 25 años son necesarios para asegurar la inversión.

En el caso de los grandes sistemas AgriPV, por ejemplo, en el segmento PMGD, es probable que sea más inusual que la empresa agrícola sea su propietaria y es viable que aumente la probabilidad de inversión externa del sistema FV (3. Inversión Externa en FV, 4. Sólo Gestión Agrícola y Operación FV, 5. Sólo Gestión Agrícola). En el caso en el que el agricultor no opere el sistema AgriPV es clave que se creen diferentes fuentes de ingresos asociadas al uso del espacio. Por un lado, los dueños de los predios encuentran una solución económica al alquilar el terreno a las empresas generadoras, considerando las sinergias agrícolas entregadas. Además, es concebible generar ingresos por la venta de electricidad a través de la copropiedad del sistema, así como una cuota para el control de malezas. En última instancia, se revelan varias oportunidades de diversificar los ingresos de los agricultores mediante el desarrollo de inversiones a escala en los segmentos de PMGD y Utility.

4. Recomendaciones para la regulación del AgriPV en Chile

A la hora de diseñar marcos regulatorios que apoyen el desarrollo del AgriPV en Chile se han identificado tres ejes de acción:

- Marco jurídico
- Incentivos financieros
- Red de actores

Tabla 3: Recomendaciones para la regulación del AgriPV en Chile.

Eje de acción	Recomendaciones
Marco jurídico	Elaborar una diferenciación formal jurídicamente vinculante entre el AgriPV y la FV convencional basándose en las definiciones internacionales.
	Incorporar en la normativa ambiental aplicable la definición de AgriPV para mantener el uso de suelo y así dar continuidad de la utilización agrícola.
	Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola.
	Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV.
Incentivos financieros	Considerar al Agri PV como una tecnología que permita generar un impacto positivo en la eficiencia hídrica.
	Establecer concursos de innovación de AgriPV que permitan monetizar las sinergias de la tecnología.
Red de actores	Crear una mesa de trabajo AgriPV con servicios públicos con competencias ambientales, industria y academia basada en la experiencia internacional.
	Considerar el AgriPV en convocatorias de I+D+i.
	Intensificar la sensibilización y educación de la tecnología entre sus posibles usuarios.

La descripción de cada recomendación, con la comparativa internacional y su aplicación en Chile se indican a continuación.

4.1 Marco jurídico

4.1.1 Diferenciar el AgriPV de la FV convencional

Comparativa internacional

En el ámbito internacional se observa una variedad de enfoques para establecer un marco legal y con ello un ecosistema habilitador para el AgriPV. Un paso inicial crítico consiste en: 1. definir formalmente al AgriPV, 2. clarificar cómo se distingue de los sistemas FV convencionales y 3. derivar en qué contextos específicos su implementación resulta apropiada. Una **definición inicial es fundamental para considerar el enfoque en los marcos legales pertinentes** relacionados con el uso de suelo, permisos de construcción y legislaciones vinculadas con la generación de energía. La Tabla 4 resume una selección de normativas y guías de diseño AgriPV.

En 2021, Alemania adoptó la normativa DINSPEC 91434 que estableció un máximo de entre 10% y 15% de reducción de superficie de cultivo. En tanto, Francia definió una guía para los sistemas AgriPV (ADEME, 2021) que fue la base para su adaptación legal bajo el Decreto nº 2024-318 de 2024 que introdujo metas numéricas relacionadas a la cantidad de cosecha y densidad de paneles (Deboutte et al., 2024). En Italia se aplicó un enfoque mixto entre objetivos y requisitos técnicos mínimos (Matalucci, 2023).

Recomendación para Chile

Siguiendo los enfoques internacionales, **se sugiere definir el AgriPV a través de una combinación de parámetros técnicos y objetivos numéricos medibles, adaptados al contexto chileno**. El objetivo principal debe ser la protección de las tierras de cultivo y la promoción de la tecnología en los casos donde el AgriPV pueda ofrecer

Tabla 4: Tabla comparativa de normas y guías de diseño AgriPV (ADEME, 2021; DIN, 2021; Matalucci, 2023).

	Alemania	Francia	Italia
Nombre	DIN SPEC 91434: Sistemas AgriPV: requisitos para el uso agrícola principal	Caracterización de proyectos FV en terrenos agrícolas y AgriPV	Directrices para el diseño, construcción y explotación de sistemas AgriPV
Institución	Instituto Alemán de Normalización	Agencia de Transición Ecológica	Ministerio de Transición Ecológica
Año	2021	2021	2022
Enfoque	Parámetros técnicos específicos como altura de paneles y superficie cultivable mínima.	Categorizar y priorizar proyectos FV en términos de sinergias, mediante criterios de calificación.	Combinación de parámetros objetivos y requisitos mínimos.
Diferenciación sistemas	Clase 1: Agricultura debajo de paneles FV Clase 2: Agricultura entre filas de paneles FV	Diferenciación mediante un gradiente de clasificación según criterios de calificación	Sistemas AgriPV: Continuidad actividad agropecuaria Sistemas AgriPV avanzados: Continuidad actividad agropecuaria con paneles elevados y monitoreo de impacto

sus mayores beneficios agrícolas y socioeconómicos. **Se recomienda definir un máximo de reducción de terreno cultivable acorde a la realidad chilena**. Por ejemplo en Alemania se sugiere una reducción de entre un 10% y 15% en función de su propio contexto. Una definición por objetivos puede garantizar que los sistemas se implementen en áreas gravemente afectadas por la sequía o la desertificación, así como en regiones caracterizadas por pobreza de recursos hídricos y energéticos.

4.1.2 Definir el tipo uso de suelo de AgriPV en la normativa ambiental

Comparativa internacional

Considerando que el sistema AgriPV combina dos tipos diferentes de producción en un solo tipo de suelo, Japón introdujo por directriz una nueva clase de uso del suelo para el uso dual (Doedt et al., 2024). Por su parte, Alemania mantuvo el estatus de uso agrícola según el plan de utilización de suelo (Trommsdorff et al., 2024). En Israel, en tanto, se gestiona el desarrollo geoespacial a través de la definición de zonas. Si una superficie ya se encuentra zonificada para AgriPV, el uso previsto de la tierra no puede cambiarse de agrícola sin penalización (Trommsdorff et al., 2024).

Recomendación para Chile

Para el contexto chileno se propone mantener el uso de suelo agrícola en sistemas AgriPV por la continuidad de la utilización agrícola. El principio rector en este caso es la comparación con la instalación de estructuras de malla sombra fijas, en las que también se mantiene el uso agrícola. Otra oportunidad relevante para regular la implementación de AgriPV se identifica a través del sistema existente, administrado por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) gestionado por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), que evalúa el impacto al recurso suelo de los proyectos. Se propone usar la definición técnica recomendada en su punto 4.1.1 (p.ej. reducción de porcentaje de superficie agrícola), ofreciendo a las autoridades un esquema claro de evaluación para determinar si los proyectos cumplen con el nivel de beneficio y garantizando que el terreno agrícola pueda reutilizarse de forma normal tras la vida útil del sistema. Al conservar la clase el terreno agrícola, también se pueden mantener las mismas directrices fiscales para la producción agrícola.

Este enfoque permitiría una evaluación exhaustiva de cada propuesta de proyecto, asegurando beneficios para la actividad agrícola. **Se sugiere utilizar la definición técnica AgriPV en la normativa ambiental y sectorial aplicable para mantener el uso de suelo y así la continuidad de la actividad agrícola**. Además, considerando el impacto en el rendimiento agrícola y la pérdida de tierras productivas, podrían definirse medidas ambientales adecuadas, que serían mínimas por la continuidad de los cultivos.

4.1.3 Modificar la legislación que regula la interacción entre la producción de alimentos y la generación de energías renovables en el mismo suelo con actividad agrícola

Comparativa internacional

En Alemania se permite la construcción de sistemas AgriPV en tierras agrícolas mediante un privilegio especial si el proyecto comprueba servir directamente a una explotación agrícola o forestal (Trommsdorff et al., 2024). Es notable que en países de gran extensión territorial como Brasil y en algunas regiones de los Estados Unidos, no existen barreras legislativas que impidan la integración de sistemas FV con actividades agrícolas.

Recomendación para Chile

Una oportunidad para implementar el sistema AgriPV en Chile lo otorga el Informe de Factibilidad de Construcción (IFC), que en áreas rurales otorga a propietarios de predios la posibilidad de realizar construcciones ajenas a la agricultura, siempre y cuando se cumplan las condiciones señaladas en la normativa y no se produzcan actividades incompatibles o nocivas para la agricultura de una zona determinada. El informe se fundamenta en el Artículo 55 de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, Decreto 458, Ley 458. Los criterios para aplicar esta norma se encuentran contenidos en la Circular 296/2019 del SAG, la que establece criterios técnicos y otros complementarios a considerar: En cuanto a las competencias del SAG, el trámite consiste en que el propietario de un predio agrícola le solicite el IFC, presentando una serie de documentos. El SAG elabora un informe técnico basado en excavaciones y un análisis de las condiciones del entorno predial considerando la vocación agropecuaria del predio. Este informe evaluará suelos de alta prioridad agrícola clasificados en las categorías I, II y III, y eventualmente IV y VI, y forma la base de información para evaluar la autorización del proyecto.

En este contexto, **se recomienda considerar la inclusión del AgriPV como una instalación compatible y beneficiosa con una función directa de servicio para la agricultura**, debido a sus funcionalidades de adaptación al cambio climático y su factibilidad de ser integrada con la producción agrícola. Es fundamental prestar especial atención al concepto de "servicio" en este análisis, lo que supone que será clave asegurar que el sistema AgriPV cumple funciones beneficiosas para la agricultura. Al considerar el AgriPV como una excepción al IFC se pueden crear beneficios relevantes para el desarrollo de este tipo de iniciativas por la disminución de la incertidumbre en el desarrollo de estos proyectos.

4.1.4 Definir un sistema de control o incentivos para asegurar continuidad de actividad agrícola en sistemas AgriPV.

Comparativa internacional

Para garantizar la continuidad de las actividades agrícolas en los sistemas AgriPV, se implementan incentivos financieros y mecanismos de supervisión en el nivel internacional. En Japón, un mecanismo estatal evalúa la actividad agrícola y el impacto de la sombra de los sistemas AgriPV en los rendimientos (Doedt et al., 2024). En Francia, se requiere reportar los resultados agrícolas a una institución de supervisión (ADEME, 2021), mientras que Israel planea crear una unidad para asegurar el cumplimiento de la normativa AgriPV. En Europa, se reformularon las subvenciones agrícolas para que también cubran las tierras de doble uso, promoviendo su viabilidad económica (Chatzipanagi et al., 2023). Además, se identifica como factible solo promover sistemas AgriPV en sectores agrícolas particulares en los cuales haya un potencial alto de sinergia y un valor agregado elevado que haga improbable abandonar las actividades agrícolas. Este enfoque se implementó en Croacia, dónde se apoya la regulación a la implementación de AgriPV en la fruticultura (Agrisolar, 2023).

Recomendación para Chile

En el contexto chileno **actualmente existe un sistema de control y seguimiento de aquellos compromisos ambientales adquiridos en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA)**, a través de la la Superintendencia Del Medio Ambiente (SMA). Mientras que se podría considerar el ejemplo del proyecto a cargo del SAG. El enfoque utilizado en el proyecto "Ayla Solar" de O'Energy (SEIA, 2020), donde se estableció un mecanismo para documentar los rendimientos de las cosechas, podría servir como modelo para esto. Como opción, AgriPV puede recibir incentivos solo para la fruticultura, donde hay un alto nivel de valor agregado y poca probabilidad de que se abandone la producción agrícola. En general, **se propone establecer un límite máximo porcentual en la proporción de terreno que un agricultor individual puede destinar a la implementación de sistemas AgriPV**, garantizando que la producción agrícola permanezca como la principal fuente de ingresos. Se sugiere que estos porcentajes oscilen entre el 10% y el 30%. Además, se propone que las instituciones y los actores clave acuerden y validen conjuntamente los valores sugeridos, asegurando así una base consensuada y robusta para la evaluación.

4.2 Incentivos financieros

4.2.1 Considerar al Agri PV como una tecnología que permita generar un impacto positivo en la eficiencia hídrica.

Comparativa internacional

En Francia, tal como se mencionó anteriormente en la Tabla 4, se realizó un gradiente según criterios de calificación, donde dichos criterios responden a las siguientes preguntas:

- Criterio 1: ¿El proyecto AgriPV brinda un servicio a la operación?, ¿de qué naturaleza?
- Criterio 2: ¿Qué impacto tiene el sistema AgriPV en la producción agrícola (rendimiento cuantitativo y cualitativo)?
- Criterio 3: ¿Cuál es el impacto del sistema AgriPV en los ingresos agrícolas?

Al responder estas preguntas, se categoriza por separado mediante cada criterio al proyecto en cuestión y permite categorizar de manera general los sistemas AgriPV acorde al nivel de sinergia agrícola que presenten, desde los menos hasta los más virtuosos (ADEME, 2021). De esta manera, se puede observar el nivel de sinergia que presenta un proyecto en específico y, por lo tanto, dimensionar el nivel de impacto positivo que tendría para la explotación agrícola.
Por otro lado, esta herramienta es útil para medir los impactos positivos y negativos que presentan los proyectos AgriPV, donde, conforme existan menos impactos ambientales negativos, el proyecto será más sustentable y tendrá que presentar menos medidas ambientales.

Recomendación para Chile

Para la implementación de sistemas AgriPV se recomienda clasificar los proyectos que entren al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de manera similar al caso francés, es decir, clasificar los proyectos según las sinergias agrícolas que presenten. El objetivo consiste en que el SEIA pueda incorporar las medidas ambientales asociadas al proyecto con las sinergias agrícolas presentadas por la tecnología. Por ejemplo, si un proyecto AgriPV ocupa de forma temporal mientras opera el sistema AgriPV el 10% del terreno y dispone de 90% para la producción agrícola, teóricamente se debiesen definir medidas ambientales adecuadas considerando el uso del 10% de terreno de la construcción FV (asumiendo que se mantiene el uso de suelo agrícola). No obstante, a lo largo del texto se exponen los beneficios que la tecnología puede presentar y que mediante una clasificación como la de Francia, se puede discernir si las sinergias entregadas por un proyecto AgriPV son altas, medias, bajas o nulas (o con mayores precisiones). Con esto en mente, un sistema AgriPV podría presentar medidas ambientales adecuadas que disminuyan los impactos ambientales dada la sinergia entre el uso agrícola y el uso PV, adaptando el cultivo al cambio climático, mejorando la producción agrícola, reduciendo el consumo de agua y mejorando los ingresos agrícolas, entre otros.

4.2.2 Establecer concursos de innovación de AgriPV que permitan monetizar las sinergias de la tecnología.

Comparativa internacional

Para compensar costos adicionales del AgriPV se introdujeron distintas medidas en varios países. Desde 2017 hay licitaciones separadas para el AgriPV en Francia, donde el objetivo es alcanzar 15 MWp de capacidad instalada al año. Las adjudicaciones se basan, por una parte, en el precio ofrecido y, por otra, en el potencial sinérgico para la agricultura. El tamaño máximo de un proyecto es de 3 MWp de capacidad instalada y los proyectos que reciben subvenciones tienen garantizada una tarifa regulada durante 20 años. Desde 2018, en Massachusetts, Estados Unidos, el Estado concede subvenciones para los sistemas que se construyen en zonas designadas para la agricultura y no superan los 5 MWp. En Alemania, la tecnología se promovió inicialmente a través de concursos de innovación y se incluye en la Ley de Energías Renovables, y se define una prima tecnológica, que se paga como subvención fija sobre la cantidad de electricidad vendida para monetizar las sinergias creadas por la tecnología (Trommsdorff et al., 2024).

Recomendación para Chile

Todavía no existe una promoción específica del AgriPV en los países latinoamericanos, lo que demuestra el potencial de Chile para desempeñar un papel pionero. A partir de esto, **se recomienda diseñar incentivos financieros que reconozcan las sinergias y beneficios a través de mecanismos y concursos presentes en el ecosistema chileno**. La **Ley N°18.450** de Fomento al Riego y Drenaje en Chile corresponde a una buena práctica que ofrece una oportunidad para financiar la integración de sistemas AgriPV con la instalación o mejora de sistemas de riego. Esta ley fue actualizada en 2023 y permite el fomento de la inversión privada de obras de riego y drenaje, es administrada por la Comisión Nacional de Riego (CNR), institución que emplea un calendario anual de concursos que permite distribuir los recursos para el cofinanciamiento de obras menores (hasta 20.000 UF), obras medianas intraprediales (desde 20.000 hasta 60.000 UF), obras medianas para organizaciones de regantes (desde 20.000 hasta 100.000 UF) y programas especiales, como son la pequeña agricultura (hasta 1.000 UF) entre otros. Este enfoque de

financiación puede cubrir hasta el 95% de la inversión para pequeños agricultores y se otorga por reembolso al concluir el proyecto, es una prometedora forma de promover la integración de AgriPV con todos sus beneficios. **Además, se sugiere, generar grupos dentro de los concursos de la Ley de Riego dedicados para proyectos AgriPV, o bien, permitir factores que favorezcan las condiciones de parámetros concursales de este tipo de proyectos respecto a fotovoltaicos convencionales**: Por ejemplo, formular factores que valoricen la superficie agrícola ahorrada por estos proyectos, además de cuantificar el ahorro de agua y el equivalente de ambos parámetros en una nueva superficie potencial para riego. Lo anterior, permitirá mejorar las condiciones de postulación a los recursos de la Ley de Riego de este tipo de iniciativas.

Por otro lado, el Ministerio de Hacienda de Chile ha establecido un Green Bond Framework para emitir bonos verdes, sociales y sostenibles, orientados a promover una transición hacia una economía baja en carbono y resiliente al clima. Dentro del presupuesto del gobierno central, los gastos elegibles incluyen exenciones fiscales y subsidios. Se ofrece financiamiento a entidades que apoyan estrategias ambientales, sociales y climáticas del país, incluyendo inversiones en infraestructura e innovación. Se ha diseñado un proceso de decisión para determinar la elegibilidad de proyectos dentro del "Marco de Bonos Sostenibles", que considera objetivos específicos y criterios de elegibilidad y exclusión. En este contexto, **se recomienda evaluar la tecnología AgriPV para financiar proyectos modelo, dado que combina beneficios energéticos, ambientales y sociales, ofreciendo una solución integral para áreas rurales.**

4.3 Red de actores

4.3.1 Mesa de trabajo AgriPV

Recomendación para Chile

Para abordar las cuestiones legislativas y utilizar así los beneficios socioeconómicos de la tecnología AgriPV de forma políticamente controlada, **se recomienda la formación de una mesa de trabajo con actores multidisciplinarios**, incluyendo al Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), al SAG, el Ministerio del Medio Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía, la Comisión Nacional de Riego, empresas de los rubros, y entidades de la academia. Alineado a la experiencia internacional, se subraya la importancia de la implicación de las instituciones del sector agrícola para desarrollar el AgriPV de cara a los retos presentes en la agricultura chilena.

4.3.2 Considerar el AgriPV en convocatorias de I+D+i

Comparativa internacional

La experiencia internacional muestra que la amplia adopción de AgriPV entre los grupos de interés depende principalmente de los resultados económicos tras su implementación. Esto justifica la inversión pública en I+D+i para empujar el desarrollo de soluciones rentables y funcionales. Es importante señalar que, en cuanto a la inversión, solo hay que financiar los costes adicionales en comparación con la energía FV convencional (véase sección 2.3). Algunas iniciativas demuestran el impacto de tales esfuerzos, como en Alemania con una región modelo para AgriPV (Región Modelo BaWü, 2022), y proyectos trinacionales financiados por la Unión Europea (PV4Plants, s.f.; Simbiosyst, 2023).

Recomendación para Chile

Se propone la creación de fondos de I+D+i gestionados por entidades como CORFO o ANID, en colaboración entre universidades, institutos de investigación y socios industriales. Estos fondos permitirían acelerar el desarrollo de soluciones AgriPV adaptadas al contexto local. En este caso, las licitaciones específicas para tecnologías para el doble uso de la capacidad de suelo, podrían dar un impulso decisivo.

4.3.3 Sensibilización, promoción y difusión

Comparativa internacional

Al establecer proyectos de infraestructura AgriPV es importante evitar conflictos de interés, adoptando medidas de mitigación que involucren a la población local y a las partes interesadas en una etapa temprana. Un ejemplo de ello es el proyecto APV-RESOLA, impulsado por el Instituto Tecnológico Evaluación y Análisis de Sistemas (ITAS) del Karlsruhe Institute of Technology, Alemania. APV-RESOLA tuvo como objetivo reunir una impresión temprana de opiniones dentro de la sociedad para identificar posibles obstáculos y facilitar las condiciones para el establecimiento exitoso de sistemas AgriPV (Moosmuller et al., 2020). Otro ejemplo de participación temprana de partes interesadas en Alemania fue el proyecto de investigación APV Obstbau (Agrivoltaic Orcharding), en el distrito de Ahrweiler en Renania-Palatinado (Gölz & Larisch et al., 2020).

En Francia, se realizaron cerca de 70 entrevistas, principalmente, a agricultores que poseían instalaciones FV en terrenos agrícolas. El análisis de las entrevistas permitió identificar los puntos fuertes y débiles de cada sistema, así como las buenas prácticas que permiten optimizar las ventajas y limitar los impactos negativos (ADEME, 2021).

Recomendación para Chile

Para maximizar la materialización de sistemas AgriPV, es esencial **intensificar la sensibilización y educación, tanto de agricultores como de consultores de riego, así como de desarrolladores de proyectos ERNC.** Esto se aplica a través de ferias, exposiciones y la colaboración con organizaciones, como el Instituto de Investigaciones Agropecuarias y la Fundación para la Innovación Agraria. Además, se recomienda realizar entrevistas con tal de conocer el contexto social y operacional de los rubros, para así promocionar una política pública de sensibilización y educación de AgriPV entre sus posibles usuarios.

Bibliografía

ACERA A.G. (2024). ESTADÍSTICAS SECTOR DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA RENOVABLE. https://www.acera.cl/centro-de-informacion/

ADEME, I Care & Consult, Ceresco, & Cétiac. (2021). Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme - Résumé exécutif de l'étude. https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4992-caracteriser-les-projets-photovoltaiques-sur-terrains-agricoles-et-l-agrivoltaisme.html

Agrisolar. (2023). Croatia takes a leap for Agrisolar. Power Solar Europe. https://agrisolareurope.org/article/croatia-takes-a-leap-for-agrisolar/

Ahn, S. Y., Lee, D. B., Lee, H. I., Myint, Z. le, Min, S. Y., Kim, B. M., Oh, W., Jung, J. H., & Yun, H. K. (2022). Grapevine Growth and Berry Development under the Agrivoltaic Solar Panels in the Vineyards. Journal of Bio-Environment Control, 31(4), 356–365. https://doi.org/10.12791/ksbec.2022.31.4.356

Al-agele, H. A., Proctor, K., Murthy, G., & Higgins, C. (2021). A Case Study of Tomato (Solanum lycopersicon var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems. Sustainability, 13(5), 2850. https://doi.org/10.3390/su13052850

Alvarez-Garreton, C., Boisier, J.P., Blanco, G., Billi, M., Nicolas-Artero, C., Maillet, A., Aldunce, P., Urrutia-Jalabert, R., Zambrano-Bigiarini, M., Guevara, G., Galleguillos, M., Muñoz, A., Christie, D., Marinao, R., & Garreaud, R. (2023). Seguridad Hídrica en Chile: Caracterización y Perspectivas de Futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, (ANID/FONDAP/1522A0001), 72 pp. Disponible en www.cr2.cl/seguridadhidrica

APV-Obstbau (Orcharding) (s.f) – Agrivoltaics as Resilience Concept for Adaptation to Climate Change in Orcharding. Fraunhofer ISE. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Recuperado de https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-obstbau-orcharding.html

Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R. L., Sutter, L., Barnett-Moreno, I., Blackett, D., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. Nature Sustainability, 2(9), 848–855. https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5

Chatzipanagi, A., Taylor, N., & Jaeger-Waldau, A. (2023). Overview of the potential and challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union (p. 57). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Comisión Nacional de Riego (CNR). (2022). GUÍA PARA PROYECTOS DE PROPIEDAD CONJUNTA EN OBRAS DE RIEGO. Ministerio de Agricultura. Ministerio de Energía. Guía-de-Propiedad-Conjunta-1-1.pdf (cnr.gob.cl)

Coordinador Nacional Eléctrico (CNE). (2024). Balance ERNC. https://www.coordinador.cl/mercados/documentos/balance-ernc/

Deboutte. (2024). France issues new rules for agrivoltaics. PV Magazine France. https://www.pv-magazine.com/2024/04/09/france-issues-new-rules-for-agrivoltaics/

Deutsches Institut für Normung (DIN). 2021. DIN SPEC 91434:2021-05 Agri-photovoltaic systems - Requirements for primary agricultural use. https://dx.doi.org/10.31030/3257526

Doedt, C., Tajima, M., & Iida, T. (2024). Agrivoltaics in Japan: A Legal Framework Analysis. AgriVoltaics Conference Proceedings, 1. https://doi.org/10.52825/agripv.v1i.533

Donoso, G., (2021) Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges. Int. J. Agric. Nat. Resour. 48(3):171-185. 202. DOI 10.7764/ijanr.v48i3.2328

Enkhardt, S. (2020). Agrivoltaic project with vertically mounted bifacial panels goes online in Germany. Pv Magazine International. https://www.pv-magazine.com/2020/10/08/agrivoltaic-project-with-vertically-mounted-bifaial-panels-goes-online-in-germany/

Fraunhofer Chile Research. (s.f.). AgriPV-Opportunities for Agriculture and Energy Transition. https://www.fraunhofer.cl/en/business_areas/photovoltaic-systems/integrated_photovoltaic/agro_pv.html
Fraunhofer Chile Research. (2018). Sistema Agro PV en Lampa, Región Metropolitana, Chile [Fotografía]. Foto proporcionada por Fraunhofer Chile Research.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (s.f.). Fotos de Prensa. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Recuperado de https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/pressefotos.html

Frost, J. (2021). Agri-photovoltaic systems - Requirements for primary agricultural use. DIN. https://www.din.de/de/wdc-beuth:din21:337886742

Garreaud, R., (2015). Informe a las Naciones. La megasequía 2010-2015: una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. https://www.cr2.cl/megasequia/

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrology and Earth System Sciences, 21(12), 6307–6327. https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017

Gestiona Energía MIPYMES, (s.f.). Modelo ESCO. Recuperado de https://mipymes.gestionaenergia.cl/modelo-esco
Gil, P. M., Maldini, F., Godoy, L., Pérez-Donoso, A., Ayala, M., & Zaviezo, T. (2022). Competencia y coexistencia de campos solares y eólicos con campos agrícolas en el contexto chileno. Centro de Políticas Públicas UC. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de https://politicaspublicas.uc.cl/publicacion/competencia-y-coexistencia-de-campos-solares-y-eolicos-con-campos-agricolas-en-el-contexto-chileno/.

Gölz, S & Larisch, F. (2020). APV-Obstbau (Orcharding) – Agrivoltaics as Resilience Concept for Adaptation to Climate Change in Orcharding. Fraunhofer ISE. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-obstbau-orcharding.html

InSPIRE. (2024). Mapa de Agrivoltaicos InSPIRE. Recuperado el 30 de junio de 2024, de https://openei.org/wiki/InSPIRE/Agrivoltaics_Map

IPCC. (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

Jiang, S., Tang, D., Zhao, L., Liang, C., Cui, N., Gong, D., Wang, Y., Feng, Y., Hu, X., & Peng, Y. (2022). Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under "agrivoltaic" system in Southwest China. Agricultural Water Management, 269. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107675
Juillion, P., Tranchant, C., Nadi, K., Crevat, C., Valle, B., Chopard, J., Lopez, G., Noel, J., Bunker, X., & Fumey, D. (2024). Effects of Dynamic Agrivoltaics on Potted Raspberry Plants: Results of the first season. Presentation at AgriVoltaics World Conference 2024 in Denver, USA.

Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., & Vercambre, G. (2022). Shading apple trees with an agrivoltaic system: Impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. Scientia Horticulturae, 306. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434

Juillion, P., Lopez, G., Fumey, D., Lesniak, V., Génard, M., & Vercambre, G. (2024). Combining field experiments under an agrivoltaic system and a kinetic fruit model to understand the impact of shading on apple carbohydrate metabolism and quality. Agroforestry Systems. https://doi.org/10.1007/s10457-024-00965-0

Jung, D., Schönberger, F., & Spera, F. (2023). Effects of Agrivoltaics on the Microclimate in Horticulture: Enhancing Resilience of Agriculture in Semi-Arid Zones. In AgriVoltaics Conference Proceedings (Vol. 2).

Massachusetts Department of Energy Resources. (2022). SMART guideline regarding the definition of ASTGU. https://www.mass.gov/info-details/smart-guideline-regarding-the-definition-of-astgu

Matalucci, S. (2023). Italian Council of State clarifies rules for agrivoltaics. PV Magazine Italy. https://www.pv-magazine.com/2023/09/05/italian-council-of-state-clarifies-rules-for-agrivoltaics/

Melo, O., & Foster, W. (2021). Agricultural and Forestry Land and Labor Use under Long-Term Climate Change in Chile. Atmosphere, 12(3), 305. https://doi.org/10.3390/atmos12030305

Model Region Agri-PV BaWü. (2022). First Implementation Phase of the Model Region Agri-Photovoltaics Baden-Württemberg. Model Region Agri-PV BaWü - Fraunhofer ISE

Moosmueller, J. (2020). KIT - ITAS - Organización - Proyectos - APV-RESOLA – Innovation group Agrophotovoltaic: Contribution to a resource-efficient land use. https://www.itas.kit.edu/english/projects_roes15_apvres.php

Mupambi, G., Sandler, H. A., & Jeranyama, P. (2022). Installation of an agrivoltaic system influences microclimatic conditions and leaf gas exchange in cranberry. ISHS Acta Horticulturae, 1337, Article 16. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1337.16

O'Energy. (2023). Ayla Solar - El Primer Proyecto Agrovoltaico en el Segmento PMGD del país. 0224_2_Brochure Ayla Solar.pdf (oenergy.cl)

Pascaris, A. S., Schelly, C., Rouleau, M., & Pearce, J. M. (2022). Do agrivoltaics improve public support for solar? A survey on perceptions, preferences, and priorities. Green Technology, Resilience, and Sustainability, 2(1). https://doi.org/10.1007/s44173-022-00007-x

Pilar, M., Maldini, F., Godoy, L., Pérez-Donoso, A., Ayala, M. (2022). Competencia y coexistencia de campos solares y eólicos con campos agrícolas en el contexto chileno. Centro UC Políticas Publicas. Pontificia Universidad Católica de Chile. https://politicaspublicas.uc.cl/publicacion/competencia-y-coexistencia-de-campos-solares-y-eolicos-con-campos-agricolas-en-el-contexto-chileno/

PV4Plants, (s.f.). AgriPV system with climate, water and light spectrum control for safe, healthier and improved crops production. PV4Plants

Rahman, A., Sharma, A., Postel, F, Goel, S., Kumar, K. & Laan, T. (2023). Agrivoltaics in India: Challenges and opportunities for scale-up. International Institute for Sustainable Development (IISD). agrivoltaics-in-india.pdf (iisd.org)

Dirección Meteorológica de Chile. (2023). Reporte anual de la evolución del clima en Chile: Informe climático del año 2022. Dirección General de Aeronáutica Civil.

Reporte Sostenible. (2019). Paneles fotovoltaicos semitransparentes instalados en un invernadero permiten cosechar sus primeros frutos. https://reportesostenible.cl/paneles-fotovoltaicos-semitransparentes-instalados-en-un-invernadero-permiten-cosechar-sus-primeros-frutos/

Rojas, M., Gallardo, L., Bozkurt, D., Urquiza, A., Billi, M., Falvey, M., Muñoz, F., Valdebenito, N., Meneses, M., Saavedra, F., Tondreau, N., & Ogaz, M. G., (2018). Simulaciones climáticas regionales: Proyecto "Simulaciones climáticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad". Santiago, Chile: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile. Retrieved from https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/Simulaciones-climáticas-regionales-2018.pdf.

Saa Isamit, C. (2023). Anteproyecto: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático Sector Silvoagropecuario [en línea]. Recuperado el 26 de julio de 2024. https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/handle/20.500.12650/73083

Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Applied Energy, 265, 114737. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737

Schröter, I., Püttschneider, N., & Mergenthaler, M. (2023). Visual Perception and Acceptance Of Agrivoltaic In An Eye-Tracking Experiment In Germany. Proceedings in Food System Dynamics, 101-115.

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. (2020). Ficha del Proyecto: Parque Fotovoltaico Ayla Solar. Ficha del Proyecto: Parque Fotovoltaico Ayla Solar (sea.gob.cl)

SolarPower Europe. (2024). Mapa Digital Agrisolar. Agrisolar Europe. Recuperado el 30 de junio de 2024, de https://agrisolareurope.org/map/

Sun'Agri. (2024). Mapa de Proyectos. Recuperado el 30 de junio de 2024, de https://sunagri.fr/en/project-map/
Symbiosyst – Create a Symbiosis where PV and agriculture can have a mutually beneficial relationship. (s.f.). https://www.symbiosyst.eu/

Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., Gudat, C., Torres, A., Gajewski, M., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer, U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, S., & Vollprecht, J., (2024). Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. A Guideline for Germany. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Retrieved from Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition - Fraunhofer ISE

Willockx, B., Reher, T., Lavaert, C., Herteleer, B., van de Poel, B., & Cappelle, J. (2024). Design and evaluation of an agrivoltaic system for a pear orchard. Applied Energy, 353. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122166

Zambrano, F., Vrieling, A., Meza, F., Duran-Llacer, I., Fernández, F., Venegas-González, A., ... & Craven, D. (2024). Shifts in water supply and demand drive land cover change across Chile. https://doi.org/10.31223/X5CD80

Zamorano, D., Homer, I., Wallberg, B., Alfaro, F., Rivera, N., Talamilla., M. (2021). Experiencia de sistema agrivoltaico en uva de mesa var. Red Globe en parrón español. Mundoagro. https://mundoagro.cl/experiencia-de-sistema-agrivoltaico-en-uva-de-mesa-var-red-globe-en-parron-espanol/

Anexo B

Caso de análisis de proyecto AgriPV existente y su respectivo análisis de costos

Análisis de costos: proyecto AgriPV Piet Albers

Tabla B.1: Perfil de costos realizado a partir de cinco proyectos de FV convencional.

Categoría	Costo Min. [USD/MWp]	Costo Max. [USD/MWp]	Promedio [USD/MWp]	Mediana [USD/MWp]	Desv. Est. [USD/MWp]
Servicios de Ingeniería	**2.447**	**5.650**	**4.294**	**4.539**	**1.415**
Suministros & Equipamiento	**403.046**	**523.759**	**466.057**	**467.060**	**17.098**
Módulos FV	220.402	241.879	228.991	222.878	10.561
Subestructura (Trackers)	100.555	110.907	105.532	106.548	4.025
Inversor de corriente	24.100	27.315	25.170	24.367	1.355
Subestación	20.012	45.423	37.255	41.503	10.049
Monitoreo - SCADA	15.760	16.888	16.122	15.987	440
Cables de Poder & Acc.	13.182	34.426	25.771	32.270	10.791
Cables Solares & Equip. Aux. Elec.	6.086	10.215	7.876	7.265	1.690
ESS & CCTV	2.948	36.707	19.340	16.243	12.497
Preparación del sitio	**8.332**	**29.126**	**14.900**	**13.555**	**5.121**
Cercado del sitio	6.665	20.663	11.817	11.795	5.457
Preparación del terreno - Externo	1.667	8.463	3.082	1.760	3.008
Trabajos de Construcción - Planta FV	**9.346**	**546.240**	**211.089**	**215.258**	**22.349**
Facilidades de sitio	8.440	23.691	15.654	12.606	6.568
Trabajos Civiles - Ext.	-	163.902	37.035	7.411	71.039
Trabajos Mecánicos - Ext.	-	202.905	123.908	190.337	102.410
Trabajos Eléctricos - Ext.	906	155.741	34.491	4.903	67.811
Trabajos de Interconexión - MV/HV	**19.600**	**214.545**	**88.065**	**66.477**	**57.525**
Trabajos de Línea de Conexión	19.124	153.536	52.792	27.161	56.874
Refuerzos eléctricos	475	61.009	35.273	39.316	23.414
Otros Costos de Proyecto	**18.550**	**56.489**	**44.228**	**49.202**	**14.844**
Total	**461.320**	**1.375.808**	**828.632**	**816.091**	**118.351**