



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE UNA PROPUESTA DE DISEÑO
FOTOVOLTAICO SOBRE PARÁMETROS CLAVE PARA UN PROYECTO
AGRIVOLTAICO EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA

DANA NATALIA PÉREZ ARREDONDO

PROFESOR GUÍA:
ALVARO VALENCIA MUSALEM

PROFESORA CO-GUÍA:
MARCIA MONTEDONICO GODOY

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PALMA BEHNKE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto FONDECYT No 1211968

SANTIAGO DE CHILE
2023

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE UNA PROPUESTA DE DISEÑO FOTVOLTAICO SOBRE PARÁMETROS CLAVE PARA UN PROYECTO AGRIVOLTAICO EN CHILE

Hoy ya son visibles los efectos del cambio climático (como altas temperaturas y sequías) los que afectan a la producción agrícola y generan competencia por el uso del suelo con el sector energético (energía solar fotovoltaica). Esto debido a que, para enfrentar la situación, se propuso avanzar hacia una matriz eléctrica con mayor participación de fuentes renovables.

Una manera de abordar esta problemática es mediante sistemas agrivoltaicos, estos consisten en la instalación de paneles fotovoltaicos en altura sobre cultivos. Estos dispositivos causan sombreado sobre el terreno y esto reduce significativamente la radiación incidente generando cambios en el microclima bajo estos dispositivos (temperatura, humedad, viento, entre otros). La disminución de este parámetro impacta disminuyendo la evapotranspiración del cultivo, lo que redundará en una menor demanda de agua por parte de este y por lo tanto en un uso más eficiente del recurso [1].

Con estos antecedentes en mente, se propone estudiar el impacto de los paneles en un proyecto agrivoltaico. Lo que implica cuantificar la potencia generada, y un análisis sobre el sombreado causado y su efecto en la radiación incidente al suelo y la evapotranspiración. Esta investigación se realiza para la región del Maule de Chile con cultivo de cerezo.

Para tal efecto, se investiga en la literatura métodos de cálculo que aborden estos modelos a proponer (sombra, radiación, potencia y evapotranspiración) quedando basados en 20 papers y un libro; y la resolución se realiza con Excel y el lenguaje de programación Python.

De esta forma se presenta una metodología capaz no solo de cuantificar los resultados para cada modelo, sino que de analizar el impacto de la variación de los parámetros de diseño del sistema fotovoltaico junto con otros factores como: el tipo de cultivo, localidad, tecnología fotovoltaica, patrones de diseños fotovoltaicos, entre otros.

Los principales resultados para el proyecto son: 1) Reducción del 86 % en la radiación neta incidente a un suelo sombreado con respecto a uno sin sombra. 2) Generación de 47,2 [MWh]. 3) Disminución de la pérdida de agua en la zona sombreada de 76 %. Lo que se traduce en un ahorro de este recurso en todo el terreno y el periodo de 134 [m^3]. 4) El mayor impacto de la sombra causada por los paneles, ocurre entre los meses de noviembre y febrero.

Sobre la variación en los parámetros de diseño se puede decir que: 1) El parámetro con mayor impacto es el objetivo de diseño. Donde existe una gran cercanía entre ST (seguimiento solar a todas horas) y el de equilibrio CT/ST (equilibrio entre producción agrícola y generación eléctrica). 2) Mayor impacto en la variación de la altura de la plataforma que en la variación de la hora en el modo CT/ST. 3) Al reducir la altura de la plataforma se aumenta la radiación y es hacia la reducción donde se nota un mayor efecto causado. 4) El aumento en escala del proyecto, le da mayor relevancia a los resultados en pérdida de agua y potencia.

*“Tengo una visión de este planeta verde azulado, seguro y en equilibrio.
Al final de la Era de los Combustibles Fósiles, estamos emergiendo a
una nueva realidad. Estamos preparados para dar el siguiente salto,
tan trascendental como abolir la esclavitud o dar el voto a las mujeres”.*

Elizabeth May

Agradecimientos

Primero que todo, dar las gracias a mi familia por el apoyo a lo largo de estos años, por la paciencia y confianza que me entregaron. Asimismo, a mis amigos, amigas y a todas las personas con las que me tope en estos años por la motivación, cariño y espacios de distracciones que tanto necesite.

Quiero agradecer especialmente al profesor Alvaro Valencia, quien me guió por las diferentes etapas de este arduo proceso. Por dedicarme todo el tiempo que necesité, por su muy buena disposición para ayudarme, los consejos y otros puntos de vista que me entrego. Que culminan como resultado en este documento.

También, a Marcia Montedonico y Rodrigo Palma, del Centro de Energía de la Universidad de Chile, por haberme abierto las puertas y dado la oportunidad de conocer el tema, y así permitirme trabajar en algo que me motiva y me acerca al mundo en el cual espero poder ser un aporte.

A la profesora Mónica Zamora por sus recomendaciones cuando solo habían dudas en cómo abordar este tema.

Al laboratorio de escritura, Armadillo Lab, por el tiempo y consejos para este documento.

Finalmente, a todas las personas que me entregaron conocimientos y que me iluminaron en el camino que quiero seguir, gracias.

Tabla de Contenido

Nomenclatura	xiv
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Alcances	4
1.4. Estructura del documento	5
2. Antecedentes	6
2.1. Estado del arte	6
2.2. Impacto de los paneles sobre el cultivo	7
2.2.1. Evapotranspiración	8
2.3. Beneficios	10
2.4. Consideraciones en diseño	11
3. Contexto del estudio	15
3.1. Características del cultivo a estudiar	16
3.2. Características de la localidad	18
3.3. Diseño optimizado	20
3.3.1. Tecnología fotovoltaica	22
4. Metodología	23
4.1. Parámetros de diseño	24
4.1.1. Modos de configuración	24
4.1.2. Distancia entre filas de paneles	26
4.2. Modelo para el sombreadamiento	28
4.2.1. Posición del sol	29
4.2.1.1. Ángulo de altitud solar	30
4.2.1.2. Ángulo cenital solar	30
4.2.1.3. Ángulo azimut solar	30
4.2.2. Posición de los paneles	31
4.2.2.1. Modo Sun Tracking	31
4.2.2.2. Modo Control Tracking	33
4.2.2.3. Modo de equilibrio CT/ST	33
4.2.3. Posición de la sombra	33
4.3. Modelo de radiación sobre el suelo	36

4.3.1.	Suelo sin sombra	36
4.3.2.	Suelo con sombra	38
4.3.2.1.	Emisividad del suelo	39
4.3.2.2.	Temperatura del panel	39
4.3.2.3.	Factor de visión	40
4.4.	Modelo para la potencia generada	41
4.4.1.	Radiación global inclinada	41
4.4.2.	Eficiencia de conversión	42
4.5.	Modelo para evapotranspiración	43
5.	Comparación de los modelos	48
5.1.	Modelo sombra	48
5.1.1.	Ángulos del sol	48
5.1.2.	Metodología	48
5.1.3.	Sombra conjunta	49
5.1.4.	Áreas sombras	52
5.2.	Modelo radiación	54
5.3.	Modelo evapotranspiración	56
6.	Resultados y discusiones generales	58
6.1.	Parámetros de entrada y principales consideraciones	58
6.1.1.	Periodo de evaluación	58
6.1.2.	Dimensión terreno	59
6.1.3.	Punto de origen	60
6.1.4.	Modelo de radiación	60
6.1.4.1.	Uso del factor de visión	61
6.1.5.	Datos Climáticos	62
6.2.	Ángulo de incidencia	63
6.3.	Potencia generada	65
6.4.	Otros	66
7.	Resultado y análisis para campo agrícola	67
7.1.	Radiación	67
7.2.	Evapotranspiración	68
8.	Resultado y análisis para proyecto agrivoltaico con diseño propuesto	71
8.1.	Sombra	71
8.2.	Radiación	75
8.3.	Potencia generada	77
8.4.	Evapotranspiración	78
9.	Resultado y análisis del impacto de los parámetros de diseño	81
9.1.	Objetivos de diseño	81
9.1.1.	Sombra	83
9.1.2.	Radiación	87
9.1.3.	Potencia generada	92
9.1.4.	Evapotranspiración	93
9.2.	Hora de cambio en modo CT/ST	96

9.3.	Altura de la plataforma	101
9.3.1.	Sombra	101
9.3.2.	Radiación	103
9.3.3.	Potencia generada	108
9.3.4.	Evapotranspiración	108
9.4.	Distancia entre filas de paneles	111
9.4.1.	Sombra	112
9.5.	Escala del proyecto	114
10.	Conclusiones	117
11.	Recomendaciones para investigaciones futuras	120
11.1.	Datos climáticos	120
11.2.	Tipo de tecnología fotovoltaica	120
11.3.	Modelos	121
	Bibliografía	122
	Anexo	127
A.	Diagrama completo del algoritmo desarrollado	127
B.	Otros resultados	128

Lista de Tablas

2.4.1. Objetivos de diseños utilizados para plantas agrivoltaicos con las tecnologías y enfoques de solución [20].	12
3.0.1. Ubicación de campo agrícola.	15
3.2.1. Amanecer, mediodía solar y atardecer para el periodo de crecimiento de una cereza considerado, en San Clemente [38].	18
3.3.1. Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico seleccionado [41].	22
4.1.1. Hora de cambio de modo Control Tracking (CT) a Sun Tracking (ST), para el modo de equilibrio CT/ST.	26
4.4.1. Datos técnicos del panel [41].	43
4.5.1. Factor k_c según etapa para manzanas, cerezas y peras [19].	46
6.1.1. Horas a estudiar para todo el periodo de evaluación.	59
6.1.2. Fuente de obtención de los datos climáticos para la ubicación del proyecto. . .	63
6.2.1. Ángulo de incidencia en las horas evaluadas para un 26 de Septiembre en modo Sun Tracking (ST), equilibrio CT/ST y Control Tracking (CT).	64
6.2.2. Alguno de los casos en donde no se cumple la tendencia esperada en el ángulo de incidencia entre los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT). . .	65
6.3.1. Alguno de los casos en donde no se cumple la tendencia esperada en la potencia generada entre los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).	66
7.2.1. ET_c en altura y volumen de agua en todo el periodo de evaluación, para el campo agrícola.	70
8.0.1. Datos de entrada del diseño de referencia para el proyecto agrivoltaico.	71
8.1.1. Ángulo de elevación e incidencia para el 17 de Enero para el proyecto agrivoltaico con modo de equilibrio CT/ST.	73
8.4.1. ET_c en altura y volumen de agua para el terreno de ensayo en todo el periodo de evaluación, para el campo agrícola y el proyecto agrivoltaico en modo de equilibrio CT/ST.	80
9.1.1. Análisis del resultado entre modos de configuración Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).	82
9.1.2. Ángulo de elevación e incidencia para el 17 de Enero para los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).	86
9.1.3. Generación de los paneles en el periodo de evaluación según el modo de configuración.	93
9.1.4. ET_c en altura y volumen de agua para el terreno de ensayo en todo el periodo de evaluación, para los distintos modos del proyecto agrivoltaico.	95
9.2.1. Horas consideradas en la variación de cambio de hora en el modo de equilibrio CT/ST, para cada caso en función de cada mes.	97
9.2.2. Variación mensual a partir de un promedio para todos los días, para la radiación neta en $[W/m^2]$ de cada caso con respecto al caso de referencia.	98

9.2.3.	Porcentaje de variación mensual a partir de un promedio para todos los días, para la radiación neta de cada caso con respecto al caso de referencia.	99
9.2.4.	Variación diaria promedio para cada mes entre cada caso y el caso de referencia, de calor recibido en el suelo en [kW].	99
9.2.5.	Generación por los paneles para cada caso de la variación en el cambio de hora del modo de equilibrio CT/ST, en todo el periodo de evaluación en [MWh] . .	100
9.2.6.	Variación de evapotranspiración en altura y volumen de agua, para los dos casos, del cambio de hora del modo de equilibrio CT/ST, con respecto al caso de referencia en todo el periodo de evaluación	100
9.3.1.	Variación promedio de sombra para todo el periodo evaluado según modo de configuración, en el caso de variación de altura de la plataforma.	102
9.3.2.	Variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para R_n en el espacio sombreado para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.	104
9.3.3.	Porcentaje de variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para R_n en el espacio sombreado de para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.	104
9.3.4.	Variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para Q_{total} en todo el terreno para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.	106
9.3.5.	Suma de la variación diaria promedio de ET_c en altura de agua, para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.	110
9.3.6.	Suma de la variación diaria promedio de ET_c en volumen de agua, para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.	110
9.4.1.	Distancias mínimas promedios y máximas para las filas de paneles según mes y modo de configuración.	112
9.4.2.	Variación promedio de sombra para todo el periodo evaluado según modo de configuración, en el caso de variación de distancia entre las filas de paneles. . .	113
9.5.1.	ET_c en volumen de agua para el terreno según modo de configuración y campo agrícola en variación de escala.	115
9.5.2.	Generación por los paneles en el periodo de evaluación según el modo de configuración para la variación en la escala del proyecto.	116

Lista de Figuras

1.1.1.	Fuente de emisiones de CO_2 al año 2018 en Chile.	1
1.1.2.	Nueva capacidad instalada entre el 2019-2030 (izquierda) y entre el 2031-2050 (derecha), en [MW] [4].	2
1.1.3.	Reducción del nivel de precipitación de 1961 a 2021 en Chile [6].	2
1.1.4.	Reducción en la temperatura media de 1961 a 2021 en Chile [6].	3
1.1.5.	Proyecto agrivoltaico, el concepto y un ejemplo.	3
2.1.1.	Países con plantas agrivoltaicas instaladas, con zoom en una situada en Chile [11],[12].	6
2.1.2.	Planta agrivoltaica de goji en Qinghai, China [13].	7
2.2.1.	Producción de biomasa (crecimiento del cultivo) y generación de electricidad en función de la irradiación solar [1].	8
2.2.2.	Estomas de una planta [17].	9
2.2.3.	Componentes asociados a la demanda del agua por un cultivo [19].	10
2.4.1.	Proyectos agrivoltaicos aplicados a campos abiertos e invernaderos [20].	11
2.4.2.	Distintos diseños del sistema fotovoltaico en proyectos agrivoltaicos en el mundo [20].	14
3.0.1.	Vista de la superficie disponible para implementar el proyecto agrivoltaico [21].	15
3.1.1.	Producción de cerezas para los países más productores en 2018 [23].	16
3.1.2.	Producción en Chile de cerezas en los últimos años [23].	16
3.1.3.	Exportación de Chile según variedad de cereza en temporada 2019-2020 [23]. .	17
3.1.4.	Comparación de radiación global en Chile y Suiza [27],[28].	17
3.1.5.	Etapas del estado fenológico de los cerezos [23].	18
3.2.1.	Factores climáticos por hora para cada mes dentro de la evaluación para la ubicación [27],[39].	19
3.2.2.	Precipitación por mes para los años 2021 y 2022 en San Clemente [40].	20
3.2.3.	Historial de precipitación en San Clemente desde el año 2019 hasta el presente (considerando hasta los valores de Octubre) [40].	20
3.3.1.	Diseño propuesto por Chasco para el proyecto [18].	21
3.3.2.	Panel fotovoltaico seleccionado [41].	22
4.0.1.	Diagrama de la metodología utilizada en esta investigación para la resolución.	23
4.1.1.	Parámetros de diseño del sistema fotovoltaico en un proyecto agrivoltaico [42].	24
4.1.2.	Diagrama de la metodología de resolución utilizado en esta investigación. . . .	27
4.2.1.	Ángulos del sol [44].	30
4.2.2.	Sistema de referencia para el azimut solar de Kalogirou.	31
4.2.3.	Seguimiento solar [44].	32
4.2.4.	Sentido para la elevación del panel.	32
4.2.5.	Concepto puntos de origen de cada fila de paneles.	33

4.2.6.	Ilustración de una planta agrivoltaica que muestra la barra en torno a la cual rota una fila de paneles [47].	34
4.2.7.	Concepto de proyección de sombra [42].	35
4.2.8.	Error obtenido para diferentes alturas y dimensiones en el panel para el trabajo de [48].	35
4.3.1.	Distribución de radiación incidente al suelo en caso agrivoltaico [20].	36
4.3.2.	Variación horaria en el albedo para la localidad de Pencahue en dos días de enero con distintos comportamientos [49].	39
4.3.3.	Parámetros involucrados en el cálculo de factor de visión [56].	40
4.5.1.	Distintos niveles posibles de cálculo en el proceso de evapotranspiración con el método de Penman-Monteith [19].	44
4.5.2.	Valor de k_c para el periodo de crecimiento de una cereza tipo Regina en Chile considerado en este estudio.	46
5.1.1.	Resultado de dos metodologías (metodología 1: sombra generada por cada vértice de cada fila de paneles y luego se crea un polígono a partir de esos vértices y metodología 2: sombra generada por cada punto perteneciente a las filas de paneles) para un 6 de Noviembre a las 14 hrs para el modo Sun Tracking.	49
5.1.2.	Resultado para los modos Sun Tracking y Control Tracking, para un 28 de Septiembre a las 8 hrs.	50
5.1.3.	Sombra conjunta para el modo Sun Tracking para un 28 de Septiembre a las 8 hrs.	50
5.1.4.	Sombra generada a nivel de suelo en las horas cercanas al amanecer donde se produce intersección de esta para todo el periodo de evaluación, en modo Sun Tracking.	51
5.1.5.	Sombra generada a nivel de suelo en las horas cercanas al atardecer donde se produce intersección de esta para todo el periodo de evaluación, en modo Sun Tracking.	52
5.1.6.	Sombra generada por un obstáculo, que representa una fila de 4 paneles, en Revit.	53
5.1.7.	Diferencia entre las coordenadas obtenidas por Revit y el modelo presentado en este estudio, para todas las horas de un 6 de Noviembre.	53
5.1.8.	Diferencia entre las coordenadas obtenidas por Revit para un panel con espesor (caso 3D) y el modelo presentado en este estudio para un panel sin espesor (caso 2D), para todas las horas de un 6 de Noviembre.	54
5.2.1.	Variación de humedad relativa y temperatura del aire en proyecto agrivoltaico cercano a Curacaví realizado por Fraunhofer Chile Research [63].	55
5.2.2.	Resultado en la radiación para un 6 de Noviembre con una fila de 4 paneles a 3 metros de altura, con Revit y el modelo presentado en esta investigación. En (a) se muestra tanto la fila en altura como su sombra y la respectiva distribución de radiación, en (b) solo se muestra la radiación incidente al suelo sombreado (único valor en todo el espacio).	56
5.3.1.	Diferencia diaria de ET_o en [mm/día] entre lo entregado en la estación de San Clemente y el resultado del modelo de esta investigación.	56
6.1.1.	Dimensiones de la superficie a evaluar, ejemplificado en una vista superior de los paneles en el terreno para un 6 de Octubre a las 12 hrs en modo Sun Tracking.	60
6.1.2.	Zonas en donde es posible obtener un valor del factor de visión a partir de las superficies de los paneles.	61

6.1.3.	Representación para el cálculo del factor de visión entre la parte trasera de los paneles de solo una fila y la sombra que esta genera.	61
7.1.1.	Radiación de onda corta, larga y neta para un suelo sin sombra (campo agrícola) en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.	67
7.2.1.	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar, ET_c , en distintas unidades de medida para el campo agrícola en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.	69
8.1.1.	Sombra generada por los paneles para el diseño de referencia (modo de equilibrio CT/ST) en un 17 de Enero.	72
8.1.2.	Sombra generada para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.	74
8.1.3.	Variación promedio del porcentaje de área sombreada con respecto al área total de ensayo para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST), para cada mes.	74
8.2.1.	Radiación en el terreno para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en un 17 de enero.	75
8.2.2.	Comparación de la radiación de onda corta para una superficie sin sombra y otra con, para el proyecto agrivoltaico según cada mes.	76
8.2.3.	Radiación de onda corta, larga y neta para una zona sombreada del proyecto agrivoltaico.	76
8.2.4.	Comparación de calor recibido en todo el terreno entre el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) y el campo agrícola.	77
8.3.1.	Potencia generada por el proyecto agrivoltaico con el diseño de referencia (modo de equilibrio CT/ST).	78
8.4.1.	ET_c en altura de agua por día para una zona sombreada del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en el periodo de evaluación.	78
8.4.2.	ET_c por hora en altura de agua para una zona sombreada y otra sin sombra del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST).	79
8.4.3.	ET_c en volumen de agua para todo el terreno de ensayo en el proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST).	79
9.1.1.	Radiación de onda larga entre el panel y el suelo en $[W/m^2]$ para todo el periodo de evaluación según modo de configuración.	83
9.1.2.	Sombra generada por los paneles para el modo Sun Tracking un 17 de Enero.	84
9.1.3.	Sombra generada por los paneles para el modo Control Tracking un 17 de Enero.	85
9.1.4.	Sombra generada en los modos Sun Tracking y Control Tracking para el proyecto agrivoltaico en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.	86
9.1.5.	Variación promedio del porcentaje de área sombreada con respecto al área total de ensayo para los modos de Sun Tracking y Control Tracking, para cada mes.	87
9.1.6.	Radiación en el terreno para el proyecto agrivoltaico con modo Sun Tracking un 17 de enero.	88
9.1.7.	Radiación en el terreno para el proyecto agrivoltaico con modo Control Tracking un 17 de enero.	89
9.1.8.	Radiación de onda larga entre el panel y suelo para cada modo.	90
9.1.9.	Radiación neta a un suelo sombreado para modo Sun Tracking y Control Tracking.	90
9.1.10.	Porcentaje de radiación neta de un suelo sombreado con respecto a un suelo sin sombra para todos los modos.	91

9.1.11. Comparación de calor recibido en todo el terreno para el proyecto agrivoltaico en cada modo y el campo agrícola.	92
9.1.12. Generación por la planta fotovoltaica para cada modo de configuración.	93
9.1.13. ET_c en altura de agua para un suelo sombreado según el modo en el periodo de evaluación.	94
9.1.14. ET_c en altura de agua hacia un suelo sombreado para los modos Sun Tracking y Control Tracking, y luego comparado con un suelo sin sombra.	94
9.1.15. Reducción de ET_c en volumen de agua de cada modo con respecto al caso agrícola para las fechas evaluadas.	95
9.2.1. Radiación neta para el caso de referencia (diseño base), el caso 12 hrs y el caso 13 hrs.	98
9.3.1. Variación en área sombreada con 3 [m] de altura con respecto al caso de referencia (3,5 [m]) para el modo Sun Tracking en hora por mes.	102
9.3.2. Variación en área sombreada con 3 [m] de altura con respecto al caso de 3,5 [m], para todas las horas y días evaluados de cada mes según los modos de configuraciones.	102
9.3.3. Porcentaje que muestra el aumento en el factor de visión al disminuir la altura a 3 [m], para cada modo de configuración.	103
9.3.4. Porcentaje que muestra la disminución en el factor de visión al aumentar la altura a 4 [m], para cada modo de configuración.	103
9.3.5. Comparación de R_n para resultados entre 3 y 3,5[m] para Sun Tracking.	105
9.3.6. Aumento o reducción en el calor recibido por el suelo de todo el terreno de ensayo para todos los modos de configuración y para todas las variaciones en altura.	106
9.3.7. Factor de visión en alturas entre 0,5 y 8 metros para cada modo de configuración.	108
9.3.8. Variación de ET_c en altura y volumen de agua diario al disminuir la altura a 3 [m], según modo.	109
9.3.9. Variación de ET_c en altura y volumen de agua diario al aumentar la altura a 4,5 [m], según modo.	109
9.4.1. Distancia mínima entre las filas de paneles, para cada hora en cada mes de evaluación y según modo de configuración.	111
9.4.2. Sombra generada para distintas distancias entre la filas de paneles para un 6 de Diciembre a las 12 hrs en modo Sun Tracking.	113
9.4.3. Sombra generada para distintas distancias entre la filas de paneles para un 6 de Diciembre a las 12 hrs en modo Control Tracking.	113
9.5.1. Diseño para evaluación del impacto de escala, mostrado para un 25 de febrero a las 13 hrs.	114
9.5.2. Aumento de área sombreada con respecto a caso de referencia en variación de escala para el periodo de evaluación.	115
9.5.3. Proyecto agrivoltaico Jack's Solar Garden, Colorado [10].	116
A.1. Diagrama más detallado de la metodología de resolución.	127
A.2. Diagrama más detallado de los ángulos del sol y panel.	128
B.1. Coeficiente de convección del viento para todo el periodo de evaluación por hora.	128
B.2. Emisividad atmosférica para todo el periodo de evaluación por hora.	128
B.3. Eficiencia de conversión del panel para cada modo de configuración para todo el periodo de evaluación por hora.	129
B.4. Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo Sun Tracking.	129

B.5.	Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo de equilibrio CT/ST.	130
B.6.	Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo Control Tracking.	131

Nomenclatura

α	Albedo del suelo
α_a	Coefficiente de absorción de la celda
α_s	Ángulo de altitud solar [°]
β	Ángulo de elevación de cada panel fotovoltaico [°]
β_{STC}	Coefficiente de temperatura de la potencia de salida máxima bajo STC [%]
Δ	Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura ambiente [KPa/°C]
δ	Declinación solar [rad]
η_{oc}	Eficiencia de conversión del panel en condiciones de operación [%]
η_{STC}	Eficiencia de la potencia de salida máxima bajo STC [%]
Γ	Ángulo de día [rad]
γ	Constante psicrométrica
λ	Calor latente de vaporización [MJ/kg]
Φ	Ángulo cenital del sol [°]
ϕ_e	Coefficiente empírico de la Ecuación de Brutsaert
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² °K ⁴])
τ	Transmitancia del sistema de cobertura
θ	Ángulo de incidencia solar sobre los paneles [°]
v	Velocidad del viento [m/s]
ε_{aire}	Emisividad del aire
ε_{at}	Emisividad atmosférica
$\varepsilon_{panel,suelo}$	Emisividad entre el panel y el suelo
ε_{panel}	Emisividad del panel fotovoltaico
ε_s	Emisividad del suelo

ξ	Cociente del peso molecular de vapor de agua/ aire seco
a_{fila}	Ancho de cada fila de paneles [m]
A_p	Área de un panel [m^2]
A_{sombra}	Área total sombreada del terreno [m^2]
A_{total}	Área total de ensayo del terreno [m^2]
AST	Tiempo solar aparente [hrs]
B	Término para ecuación del tiempo [°]
C_p	Calor específico a presión constante del aire [$MJ/kg^\circ C$]
D	Distancia entre las filas de paneles [m]
$e^\circ(T_a)$	Presión de saturación de vapor a la temperatura ambiente [KPa]
e_a	Presión real de vapor del aire [KPa]
ET	Ecuación del tiempo [min]
$ET_{c,aj}$	Evapotranspiración del cultivo bajo varias condiciones de manejo y ambientales) [$mm/periodo\ de\ tiempo$] o [$m^3/periodo\ de\ tiempo \cdot \acute{a}rea\ considerada$]
ET_c	Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar [$mm/periodo\ de\ tiempo$] o [$m^3/periodo\ de\ tiempo \cdot \acute{a}rea\ considerada$]
ET_o	Evapotranspiración del cultivo de referencia [$mm/periodo\ de\ tiempo$] o [$m^3/periodo\ de\ tiempo \cdot \acute{a}rea\ considerada$]
f_H	Factor de claridad
$FV_{panel,suelo}$	Factor de visión entre la parte trasera del panel y el suelo
G	Densidad del flujo de calor del suelo [W/m^2]
gcr	Ground Coverage Ratio: coeficiente de cobertura del suelo
H	Altura de la plataforma, es decir, desde el suelo hasta el punto medio de la fila de paneles [m]
h	Ángulo horario [°]
$h_{w,NOCT}$	Coeficiente de convección del viento bajo NOCT
h_w	Coeficiente de convección del viento
HR	Humedad relativa del aire [%]
I_{bi}	Radiación directa inclinada [W/m^2]
I_b	Radiación directa horizontal [W/m^2]
I_{di}	Radiación difusa inclinada [W/m^2]

I_d	Radiación difusa horizontal [W/m^2]
I_{GH}	Radiación global horizontal [W/m^2]
I_{GI}	Radiación global inclinada [W/m^2]
I_{NOCT}	Radiación bajo NOCT [W/m^2]
$k_{c,final}$	Coefficiente único de cultivo en etapa final
$k_{c,inicial}$	Coefficiente único de cultivo en etapa inicial
$k_{c,med}$	Coefficiente único de cultivo en etapa de mediados de temporada
k_c	Coefficiente único de cultivo
L	Latitud de la localidad [°]
LL	Longitud de la localidad [°]
LST	Tiempo local estándar [min]
N	Número que representa el día del año
n_{filas}	Cantidad de filas de paneles
$n_{paneles}$	Cantidad de paneles por cada fila de paneles
P	Presión atmosférica [KPa]
P_{out}	Potencia generada por un panel [W]
$Q_{total,agrivoltaico}$	Calor recibido en el suelo para el proyecto agrivoltaico [W]
$Q_{total,agrícola}$	Calor recibido en el suelo para el campo agrícola [W]
$R_{n,con\ sombra}$	Radiación neta incidente a un suelo sombreado [W/m^2]
$R_{n,sin\ sombra}$	Radiación neta incidente a un suelo no sombreado [W/m^2]
R_n	Radiación neta incidente al suelo [W/m^2]
R_{oc}	Radiación de onda corta o solar, incidente al suelo [W/m^2]
R_{ol}	Radiación de onda larga o térmica, incidente al suelo [W/m^2]
SL	Longitud estándar [°]
$T_{a,NOCT}$	Temperatura del aire bajo NOCT [°C]
T_a	Temperatura del aire [°C]
T_{cel}	Temperatura de la celda del panel [°C]
T_{NOCT}	Temperatura de la celda bajo NOCT [°C]
T_p	Temperatura de la parte trasera del panel [°C]

T_{STC}	Temperatura de la potencia de salida máxima bajo STC [°C]
T_s	Temperatura del suelo [°C]
x_c	Coordenada en eje oeste/este del centroide de la fila de paneles
x_o	Coordenada en eje oeste/este del punto original perteneciente a la fila de paneles
x_p	Coordenada en eje oeste/este del punto perteneciente a la fila de paneles
x_s	Coordenada en eje oeste/este de la sombra
y_c	Coordenada en eje norte/sur del centroide de la fila de paneles
y_o	Coordenada en eje norte/sur del punto original perteneciente a la fila de paneles
y_p	Coordenada en eje norte/sur del punto perteneciente a la fila de paneles
y_s	Coordenada en eje norte/sur de la sombra
Z	Ángulo azimut del sol [°]
z_c	Coordenada en altura del centroide de la fila de paneles
z_e	Elevación sobre el nivel del mar [m]
z_o	Coordenada en altura del punto original perteneciente a la fila de paneles
z_p	Coordenada en altura del punto perteneciente a la fila de paneles
Z_s	Ángulo de azimut de la superficie de los paneles [°]

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

En la actualidad ya es posible advertir los efectos derivados del cambio climático que están afectando a diferentes necesidades humanas en todo el mundo. En particular en Chile, se ha observado un aumento de las temperaturas lo que provoca incendios forestales, olas de calor y sequía, distintos patrones en la precipitación y variación en las heladas.

En esta línea, líderes del mundo se están reuniendo para lograr acuerdos y acciones concretas para enfrentar esta situación y evitar su empeoramiento.

Para tal efecto es necesario reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principal causa de la existencia del cambio climático. En el año 2018 en Chile se encontró que el 77 % de las emisiones de CO_2 (componente principal de los GEI) tiene como responsable a la industria energética [2] (como se muestra en la Figura 1.1.1).

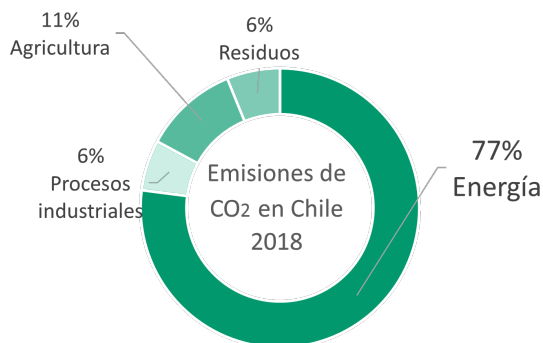


Figura 1.1.1: Fuente de emisiones de CO_2 al año 2018 en Chile.

Es por esto que, el estado se ha planteado una serie de compromisos a través de sus instrumentos de política pública, enfocados en el sector energético. Uno de estos es alcanzar la carbono neutralidad al año 2050, acordado por varios países en el Acuerdo de París [3], y para alcanzarlo se ha propuesto que ya en el año 2030 las energías renovables representen un 60 % de la matriz eléctrica.

Actualmente representan un 35,5 % de la matriz, implicando una necesidad de crecimiento importante en los próximos años y en específico, para la más barata en la generación: la energía solar fotovoltaica. En la Política Energética de Largo Plazo del año 2019 [4], se simularon distintos escenarios y en todos estos se espera contar con un crecimiento importante en este tipo de energía, como se muestra en la Figura 1.1.2.

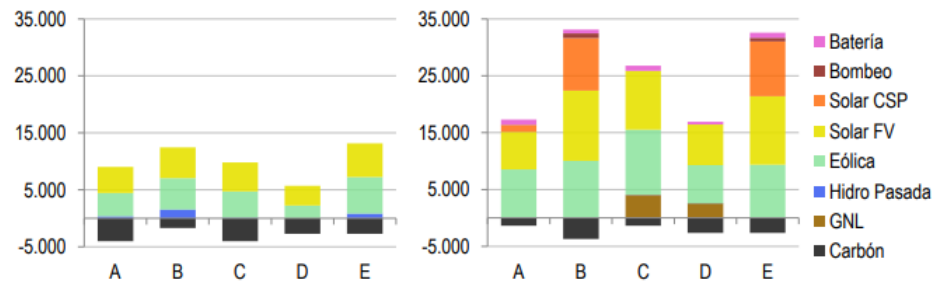


Figura 1.1.2: Nueva capacidad instalada entre el 2019-2030 (izquierda) y entre el 2031-2050 (derecha), en [MW] [4].

Por otro lado, continuando con los efectos del cambio climático, la profesora Paulina Aldunce de la Facultad de Ciencias Agronómicas y del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, declaró que el riesgo más importante es la reducción de la disponibilidad de agua [5].

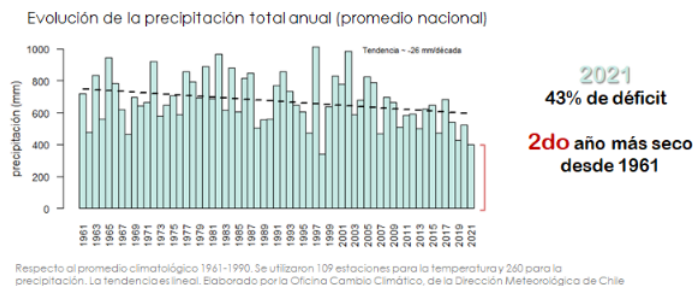


Figura 1.1.3: Reducción del nivel de precipitación de 1961 a 2021 en Chile [6].

El impacto en el abastecimiento de agua, el aumento de temperaturas junto con las olas de calor y el crecimiento importante de la población, afectan de manera considerable a la seguridad alimentaria. La agricultura chilena es responsable del 73 % del uso del agua, en valores del año 2021 [7]. Generándose así que este sector sea uno de los más vulnerables en los escenarios proyectados por los efectos del cambio climático.

Frente a esta problemática este sector debe planificar medidas de adaptación para alcanzar una resiliencia climática. En la Figura 1.1.4 se muestra cómo ha aumentando la temperatura media en el país.

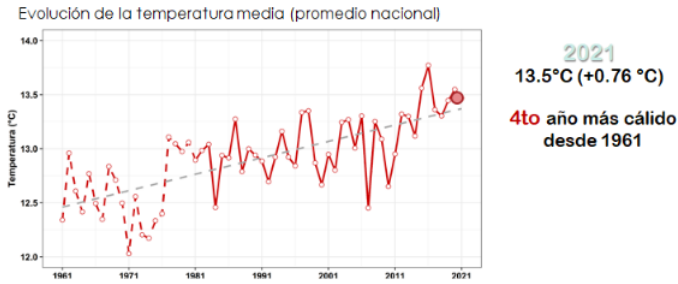


Figura 1.1.4: Reducción en la temperatura media de 1961 a 2021 en Chile [6].

En cuanto al uso de agua, el académico de la Universidad de Chile Pablo García recorrió lugares emblemáticos en materia de este recurso y propone desarrollar una mejor gestión basada en el riego eficiente, el control de la evaporación del suelo y un estudio para la elección del tipo de cultivo a plantar según las condiciones de la zona (ya que los rendimientos de ciertos cultivos están variando con las nuevas condiciones climáticas) [8].

Este es el contexto actual y porvenir en el país: por una parte con el crecimiento de la energía solar fotovoltaica como método para reemplazar otras fuentes de generación altamente contaminantes, y por otro con la agricultura intentando abastecer a una mayor población enfrentando problemas de abastecimiento de agua. Estas soluciones, para afrontar el calentamiento global con sus efectos, puede causar otras problemáticas, como ya está ocurriendo en otros países como España y se está empezando a percibir en Chile. Como ya se ha explicado, ambas deben crecer y para eso requieren de grandes superficies de tierra. Es aquí donde se puede provocar un conflicto o competencia entre ambos sectores, los cuales satisfacen necesidades humanas esenciales para la vida de las personas, por el uso de la tierra.

Así el concepto de sistema agrivoltaico da una respuesta a este desafío, al proponer un doble uso del suelo con paneles fotovoltaicos en altura sobre plataformas que permitan el crecimiento de cultivos bajo estos, como se ilustra en la Figura 1.1.5.



Figura 1.1.5: Proyecto agrivoltaico, el concepto y un ejemplo.

Los paneles causan un cambio en el microclima que se genera bajo estos, esto es, en las condiciones climáticas (radiación incidente al suelo, temperatura del aire y suelo, velocidad del viento y humedad relativa del aire). Visualmente esto se observa como sombra sobre ciertas zonas del terreno, pero esto se traduce principalmente en una reducción de luz o radiación

hacia los productos agrícolas y el suelo.

Esto no solo ayuda a proteger a los cultivos frente a variaciones climáticas extremas (altas temperaturas), sino que causa la reducción en la radiación, lo que a su vez provoca una menor tasa de pérdida de agua en el proceso de evapotranspiración. Generando así un uso más eficiente de este recurso bajo el concepto agrivoltaico. Más adelante se entrará en detalle sobre esto.

De esta manera, se presenta una propuesta que manifiesta una medida eficiente de adaptación frente al cambio climático al abordar el nexo: alimento, agua y energía, y al prevenir escenarios que podrían generar problemáticas en el país; todo en función de un desarrollo sostenible, pero también sustentable.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar el impacto causado por los paneles fotovoltaicos sobre la radiación incidente al suelo, el proceso de evapotranspiración del cultivo y la potencia generada, en una propuesta de sistema agrivoltaico sobre cerezos en la región del Maule, en Chile.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Modelar la sombra que generarían los paneles fotovoltaicos.
2. Realizar un estudio energético para cuantificar la radiación incidente al suelo.
3. Calcular la potencia generada por los paneles fotovoltaicos.
4. Realizar un estudio hídrico en base al proceso de evapotranspiración del cultivo.
5. Desarrollar un código en lenguaje Python que integre los modelos de sombra, radiación, evapotranspiración y potencia generada.
6. Comparar los resultados obtenidos entre un campo agrícola sin paneles y uno con paneles (proyecto agrivoltaico).
7. Evaluar el impacto que tiene la variación de parámetros de diseño del sistema fotovoltaico en los distintos modelos considerados.

1.3. Alcances

1. Se realiza el estudio para una localidad específica de Chile.
2. Se evalúa los resultados solo para cerezos.
3. Se evalúa un tipo de panel con dimensiones fijas y seguimiento en solo el eje de elevación. Se asume 100 % opaco y con espesor despreciable.
4. Se asume que el terreno de ensayo presenta un suelo uniforme en altitud.

5. Se considera que el factor de claridad y las radiaciones globales, difusas y directas horizontales no varían entre los días de un mes, es decir, no hay variabilidad entre el comportamiento de los días de un mes. Esto debido a el paso de tiempo de los datos de la herramienta Explorador Solar.
6. Se asume que el albedo del suelo es constante, es decir, sin variación en el transcurso del crecimiento del cultivo.
7. No se considera un cambio en la temperatura del aire, temperatura del suelo, humedad relativa del aire, velocidad del viento, albedo y emisividad del suelo en las zonas sombreadas por los paneles fotovoltaicos.
8. Para el cálculo de la sombra solo se evalúa la generada por los paneles, no se considera la causada por la plataforma.
9. Para el análisis de la demanda de agua solo se contempla el proceso de evapotranspiración, no el agua debido a lluvias, riego y napas subterráneas.

1.4. Estructura del documento

El presente documento comienza con la contextualización de este tipo de proyectos en el mundo, caracterizando los diferentes enfoques y diseños que se pueden encontrar para seguir con una explicación de los antecedentes teóricos que se tienen hasta el momento sobre el objetivo general de este trabajo, es decir, el impacto ocasionado por el sistema fotovoltaico.

Luego se detalla el marco en el que se desarrolla esta investigación, a cargo del Centro de Energía de la Universidad de Chile.

Para así continuar con la metodología desarrollada para alcanzar los distintos objetivos propuestos y la definición de los parámetros de diseño considerados. Se explica en detalle cada concepto abordado y la justificación de la elección de cada uno de los métodos de cálculos seleccionados.

Para obtener cierta validación, se compara los distintos modelos con las herramientas existentes que abordan los mismos temas.

Luego se continúa con la presentación de los resultados. Esta etapa comienza con la discusión preliminar de algunos resultados generales y la forma en la que se aborda ciertas problemáticas. Se sigue con la exposición de los resultados para un campo agrícola y posteriormente para los obtenidos en un proyecto agrivoltaico. Se finaliza esta etapa mostrando el impacto que tienen ciertos parámetros de diseño sobre los modelos desarrollados en la presente investigación.

Finalmente, se presenta una conclusión para los resultados obtenidos en las distintas categorías y se presenta un capítulo que aborda recomendaciones orientadas a las personas que desean continuar con el trabajo desarrollado en este documento.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Estado del arte

El término nace en 1981 por Adolf Goetzberger y Armin Zastrow, pero no fue hasta el año 2004 en donde creció el interés. Se pasó del año 2012 con 5 [MW] instalado en el mundo a tener 15 [GW] en el año recién pasado [1]. En la Figura 2.1.1 se puede observar a los países con proyectos desarrollados.

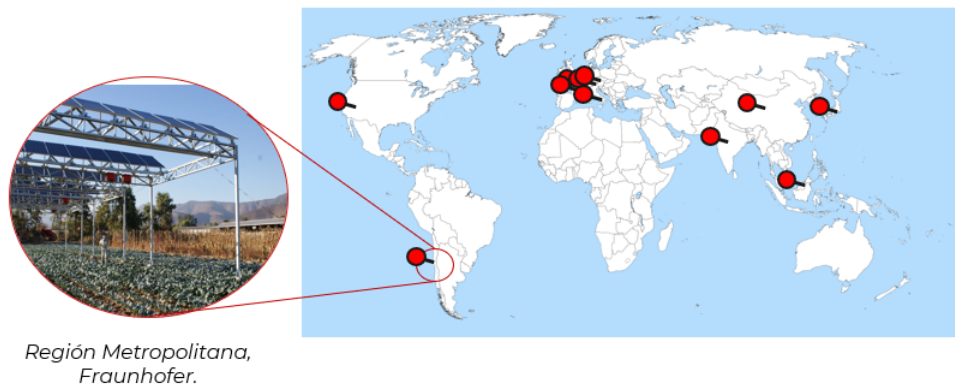


Figura 2.1.1: Países con plantas agrivoltaicas instaladas, con zoom en una situada en Chile [11],[12].

De estos se puede destacar a China, que tiene la mayor cantidad instalada y una planta en el desierto de Gobi que busca combatir la desertificación con el cultivo de goji (Figura 2.1.2).



Figura 2.1.2: Planta agrivoltaica de goji en Qinghai, China [13].

Como se observa en la Figura 2.1.1, Chile es pionera en este tipo de proyectos en latinoamérica. En la ciudad de Santiago se encuentran 3 experiencias ejecutadas por la fundación Fraunhofer Chile, en el norte del país (Valle del Limarí) se ubica otro desarrollado por la Universidad de Chile a través del Centro de Estudios de Zonas Áridas y en la Región de O'Higgins se localiza uno aplicado a un invernadero ejecutado por la Universidad de O'Higgins.

Chile en su largo territorio posee tierras áridas con elevadas radiaciones, las cuales se consideran como los lugares más prometedores para la aplicación de este tipo de proyectos. Además de la planta en Arizona de Estados Unidos, Chile es el único otro lugar con plantas en este tipo de zonas.

2.2. Impacto de los paneles sobre el cultivo

El emplazamiento de paneles fotovoltaicos a un campo agrícola causa una variación en el microclima formado entre el cultivo o suelo y estos dispositivos. El porcentaje de variación alcanzado depende principalmente de los factores climáticos de la zona, del manejo sobre el cultivo, del tipo de producto cultivado y el diseño del sistema fotovoltaico.

Por otro lado, el microclima se caracteriza por la radiación incidente, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento.

El parámetro que sufre una mayor alteración es la radiación (se ha encontrado una baja de un tercio de esta y valores más altos para días con mayores temperaturas [1]). Como se observa en la Figura 1.1.5.b, los paneles son un obstáculo a los rayos solares que vienen de forma directa, ocasionando así sombra sobre el terreno según la dirección de estos rayos y disminuyendo la radiación que logra incidir en estas zonas.

Por esta razón se recomienda utilizar este tipo de proyectos en localidades en donde las radiaciones y temperaturas actualmente están alcanzando valores muy altos, ya que allí es más usual presenciar los llamados golpes de sol o quemaduras sobre algunos cultivos específicos, como por ejemplo, manzanos. Estos trastornos fisiológicos afectan su calidad o pueden llegar a provocar pérdidas de producción.

Como se puede desprender de lo anterior, la radiación es un parámetro esencial en la producción o desarrollo del cultivo, puesto que una parte del espectro es utilizado para el proceso de fotosíntesis. Generalmente, un mayor valor en la radiación resulta en niveles más

altos de fotosíntesis hasta que la formación de biomasa alcanza eventualmente una tasa máxima [1]. Existe un punto en donde la tasa de fotosíntesis deja de aumentar, denominado punto de saturación de luz, y como resultado deja de ser necesario la exposición a la luz (ver Figura 2.2.1). En efecto, si se sigue aumentando en creces, se pueden generar efectos negativos sobre la plantación.

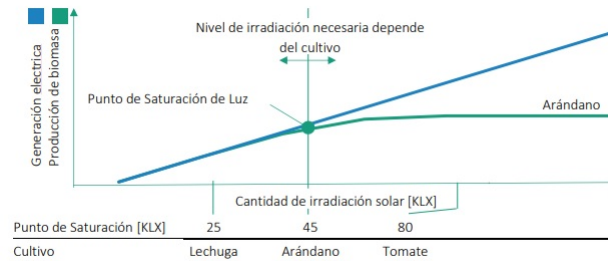


Figura 2.2.1: Producción de biomasa (crecimiento del cultivo) y generación de electricidad en función de la irradiación solar [1].

Otro parámetro que en la literatura ha obtenido una variación no menor en ciertas condiciones, es la humedad relativa en el aire. Esta alude a la cantidad de vapor de agua contenida en el aire con respecto a la máxima cantidad que podría contener. Se ha encontrado entre 10 a 20% de variación en las plantas de Fraunhofer [1].

En cuanto a los parámetros restantes, temperatura del aire y la velocidad del viento, se tiene una leve variación.

De estudios, se ha observado la relación entre la altura de la plataforma y la variación de la temperatura del aire. Al parecer, una menor altura afecta más al microclima y disminuye más la temperatura del aire (1 a 3 °C [14]). A pesar de ser un valor menor, ocasiona una variación en la temperatura del panel causando así una mayor eficiencia por parte de este [15].

Por otro lado, la velocidad del viento mostró una leve variación (disminución en 0,33 [m/s] con altura de la plataforma en 0,5 [m] y aumento de 0,12 [m/s] en 2,7 [m] [16]). La tendencia de la variación depende de los parámetros de diseño del sistema y la localidad.

Cabe mencionar que en lugares con episodios de granizo, los paneles pueden generar una protección al cultivo, considerando que la tecnología fotovoltaica puede estar preparada para resistir estos golpes.

Con todos estos cambios del microclima comentado (con la radiación y la humedad relativa como principales actores) es que se provoca una disminución en la pérdida de agua por parte del cultivo y el suelo mediante el proceso denominado evapotranspiración.

A continuación, se entra en detalle sobre este proceso.

2.2.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración alude a la pérdida de agua en procesos de evaporación desde el suelo y transpiración del cultivo.

En el primer proceso, el agua líquida contenida en el suelo se convierte en vapor y se pierde al ambiente. Por un lado, esto sucede cuando en el suelo se alcanza un valor determinado de energía, mediante la radiación solar incidente y la temperatura ambiente, capaz de llevar el proceso adelante. Por ende, a mayor valor en estos factores, mayor es la tasa de evapotranspiración (mayor pérdida de agua).

Luego, para que ocurra el retiro de este vapor de agua, juegan un rol importante la humedad atmosférica y la velocidad del viento. A menor humedad en el ambiente del cultivo y a mayor velocidad del aire, mayor es la tasa de este proceso.

Generalmente, el suelo obtiene esta agua líquida gracias a lluvias y riego (aquí inciden las condiciones de manejo del cultivo).

En cuanto a la transpiración del cultivo, el proceso es similar. El agua líquida contenida en los tejidos de la planta se convierte en vapor, principalmente través de los estomas (ver Figura 2.2.2).

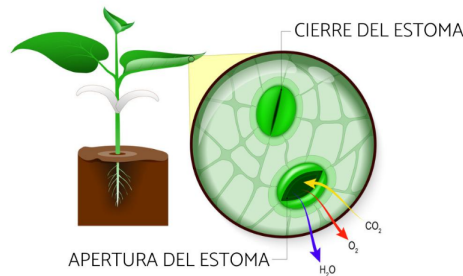


Figura 2.2.2: Estomas de una planta [17].

Dentro de una planta el agua es absorbida por las raíces y conducida a través de la planta. Los estomas se encuentran en las hojas de las plantas y es aquí donde ocurre el intercambio con la atmósfera. Así, una fracción del agua se convierte en parte de los tejidos de la planta y la otra se evapora al ambiente.

En ambos procesos afectan los mismos factores. A estos se le suma, la capacidad del suelo de conducir el agua hacia las raíces (depende del tipo de suelo) y la cantidad de agua contenida (depende del manejo del cultivo como el riego).

Cuando una planta se ve expuesta a temperaturas altas lo que ocurre es que el déficit de presión de vapor del aire se eleva fuertemente, lo que hace que las plantas transpiren más, perdiendo más agua, en donde estas se defienden cerrando sus estomas, lo que puede tener ciertas consecuencias negativas [18].

El porcentaje de radiación incidente al suelo va disminuyendo a medida que el cultivo va desarrollándose debido a que el dosel va creciendo y proyectando sombra, pero esto no será considerado en este estudio.

Ahora bien si se habla de balance hídrico sobre un cultivo, este está determinado por dis-

tintos componentes, como el proceso explicado anteriormente sumado a riego, precipitaciones y flujos verticales de agua por debajo de la zona radicular (observar Figura 2.2.3).

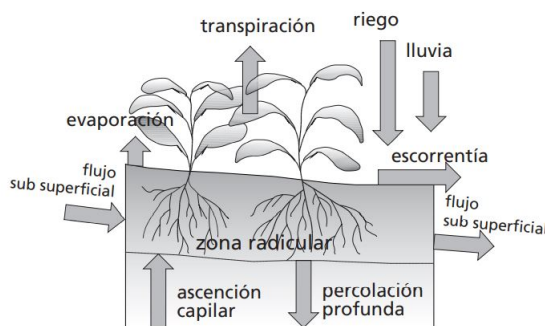


Figura 2.2.3: Componentes asociados a la demanda del agua por un cultivo [19].

Todos estos son factores difícil de cuantificar teóricamente, en consecuencia en la presente investigación se estudia solo el proceso de evapotranspiración.

2.3. Beneficios

En líneas generales, los beneficios asociados a proyectos que han sido construidos en el mundo, derivados de los efectos nombrados anteriormente, comprenden los siguientes:

Alimento:

- El impacto sobre el producto agrícola depende de los niveles alcanzados en la variación del microclima y como esto afecta al desarrollo de este. Si este logra adaptarse positivamente o no, depende del tipo de cultivo, del manejo sobre este y factores climáticos. No se puede predecir cómo se comportará, pero se ha encontrado una gran variedad de frutos con influencias positivas o con impacto en detalles menores, como por ejemplo, en su apariencia.
- Frente a eventos climáticos extremos, el agrivoltaico ayudaría a encontrar una viabilidad para la producción agrícola adaptada a los nuevos factores climáticos con los paneles como herramientas de protección hacia los cultivos.

Energía:

- Energía proveniente de una fuente renovable, apoyando al proceso de transición energética del país.
- Genera la oportunidad de ser utilizada como método para la descentralización de la electricidad, al llegar a zonas rurales donde actualmente no existe conexión a la red.
- El cambio en el microclima podría generar una mayor eficiencia en los paneles al disminuir su temperatura.

Agua:

- Mayor eficiencia en el uso del agua por parte de los cultivos y suelo, implicando un menor requerimiento de agua para irrigación (riego).
- Mejor gestión del recurso al utilizar el agua de limpieza de paneles a su vez para el riego de la plantación.
- Asimismo, hay proyectos que han diseñado la plataforma y diseño fotovoltaico con el objetivo de almacenar el agua de lluvias.
- De esta manera se combate la sequía. Aunque hay que recalcar que el nivel de reducción en la pérdida de agua depende de varios factores.

Suelo:

- Uso eficiente al tener un doble uso del terreno.
- Se evita el conflicto por la posesión de terrenos.
- Se puede prevenir la degradación de otros espacios.

Socio-económico:

- Beneficio económico de la generación de electricidad, ya que generalmente la producción agrícola consume menos de un 1 % de la electricidad generada [15].
- Espacio de trabajo sombreado para los trabajadores.

2.4. Consideraciones en diseño

Con el impacto de la instalación del sistema fotovoltaico a un campo agrícola ya dilucidado, se puede entrar a la discusión en diseño de estos proyectos.

Antes que todo, se debe informar que este tipo de dinámicas se utiliza en campos abiertos e invernaderos (Figura 2.4.1).

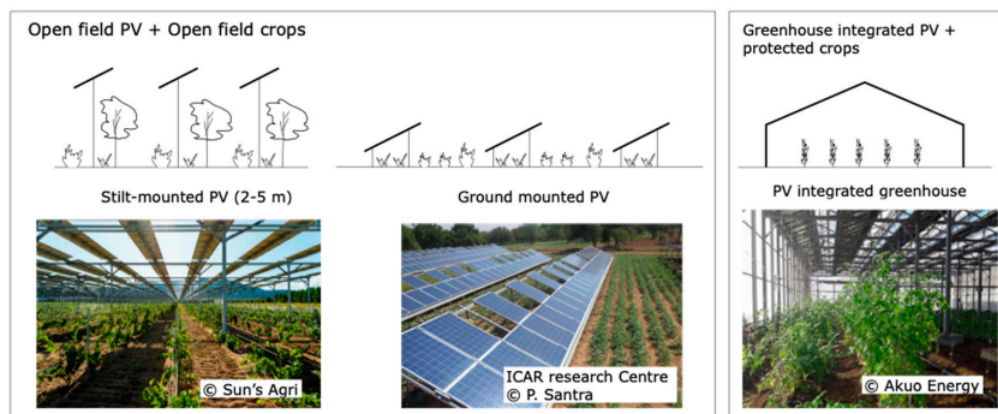


Figura 2.4.1: Proyectos agrivoltaicos aplicados a campos abiertos e invernaderos [20].

Sin embargo, este estudio se basa en plantas orientadas a campos abiertos. Lo cual genera un espacio de oportunidad, ya que un 47% de las publicaciones para este tema están orientadas a la aplicación en invernaderos [20].

Para este caso, en el mundo se encuentran varios diseños, tipo de tecnologías fotovoltaicas usadas, tipo de cultivos plantados y objetivos buscados con este tipo de proyectos. Globalmente esto se resume en la Tabla 2.4.1.

Tabla 2.4.1: Objetivos de diseños utilizados para plantas agrivoltaicos con las tecnologías y enfoques de solución [20].

Objetivo de diseño	Enfoques de solución	Tecnología de solución
Minimizar sombra sobre cultivos (rendimiento de biomasa)	-Distancia entre fila de paneles. -Altura de la plataforma.	-Sistema de seguimiento solar. -Tecnología fotovoltaica: semitransparente, fotoselectivo de luz.
Maximización de generación eléctrica	-Distancia entre fila de paneles y altura de la plataforma (por sombreadamiento por dispositivos). -Orientación paneles: elevación y azimut.	-Sistema de seguimiento solar. -Paneles eficientes (ej: bifacial).
Aceptación social (uso de tierra)	-Altura de la plataforma (baja por impacto visual). -Patrón en el diseño fotovoltaico alineado con campo agrícola. -Sistemas desmontables. -Uso de zonas marginales.	Nuevos materiales para la estructura.

Como ya fue comentado, se puede provocar una gran variación en el microclima hacia la plantación, y dependiendo del tipo de cultivo, se puede generar efectos negativos en su desarrollo.

Es por esta razón que existe un objetivo de diseño que busca impactar en menor medida para no afectar de manera negativa a la productividad agrícola. Para esto se debe tener en consideración la intensidad de luz solar que requiere el fruto, la protección climática y maquinarias que trabajan en el lugar. Las primeras categorías son difíciles de abordar, ya que el desarrollo y crecimiento de un cultivo es un proceso complejo que depende de diversos factores.

Como ejemplo se puede nombrar a lechugas y repollos, sobre los cuales se ha observado una mantención e incluso un aumento en su producción en ciertos proyectos.

Por el contrario, está el objetivo enfocado en la generación de electricidad, el cual trae consigo el mayor impacto a las condiciones climáticas sobre el cultivo y suelo. Para lograr una maximización de la electricidad se requiere de un seguimiento constante hacia la dirección del sol, de esta manera se ocasiona un mayor nivel de sombra sobre el suelo y cultivo.

Una categoría menos conocida o utilizada es la enfocada en la aceptación social. Esta considera problemáticas que podrían ser percibidas por la ciudadanía que conviva cerca de estos proyectos.

En la Tabla 2.4.1 se mencionan las tecnologías utilizadas y parámetros para enfocarse en la optimización del objetivo definido.

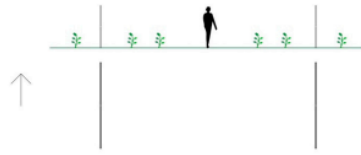
Hay que agregar que también se observa un interés en generar un equilibrio entre la productividad del cultivo y la generación de electricidad, la cual estudia las tecnologías y enfoques de ambos objetivos.

En definitiva, según el objetivo escogido es que se diseña el sistema fotovoltaico y se escoge el tipo de cultivo (si es que se comienza desde cero en la construcción de este tipo de plantas). La otra perspectiva utilizada es la construcción sobre un campo agrícola con un cultivo ya existente, por lo que en estos casos se adapta el diseño fotovoltaico.

De esta forma existen varios patrones de diseño los cuales buscan distintos objetivos, la mayoría de estos se encuentran en la Figura 2.4.2.



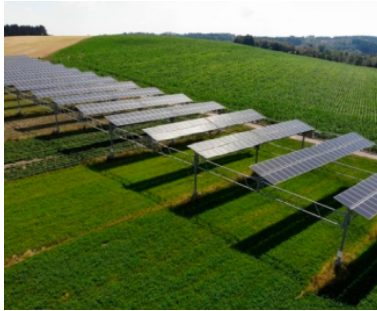
(a) Austria.



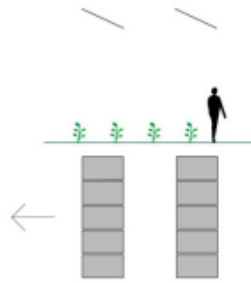
(b) Austria patrón.



(c) Malasia.



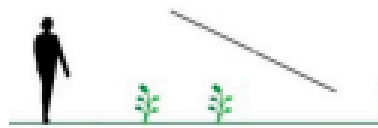
(d) Alemania.



(e) Alemania patrón.



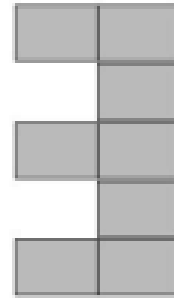
(f) Francia.



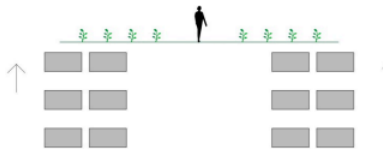
(h) India patrón.



(g) India.



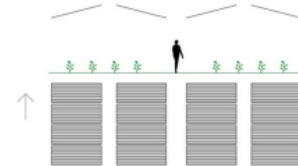
(i) Italia.



(j) Italia patrón.



(k) Países bajos.



(l) Países bajos patrón.

Figura 2.4.2: Distintos diseños del sistema fotovoltaico en proyectos agrivoltaicos en el mundo [20].

Capítulo 3

Contexto del estudio

El presente estudio se aborda un proyecto a cargo del Centro de Energía de la Universidad de Chile, el cual plantea la implementación de una planta agrivoltaica sobre un campo agrícola específico. Este se encuentra en la localidad de San Clemente de la Región del Maule en Chile. En la Tabla 3.0.1 se puede ver el detalle de su ubicación.

Tabla 3.0.1: Ubicación de campo agrícola.

Categoría	Valor
Latitud	-35,4712 °
Longitud	-71,4976 °

Actualmente contiene manzanos y cerezos cultivados, pero por razones económicas se diseña la construcción de la planta agrivoltaica en el sector de cerezos, en particular de variedad Regina. El espacio destinado tiene una superficie de 6,1 hectáreas y está orientada 32° NE. Este se muestra en la Figura 3.0.1.



Figura 3.0.1: Vista de la superficie disponible para implementar el proyecto agrivoltaico [21].

Chasco [18] propuso un diseño para el sistema fotovoltaico, el cual será considerado como el diseño base para esta investigación. En la Sección 3.3 se describirá en más detalle.

3.1. Características del cultivo a estudiar

Chile es el mayor productor de cerezas del hemisferio sur [22] ubicándose en el cuarto lugar de todos los países productores, como se observa en la Figura 3.1.1.

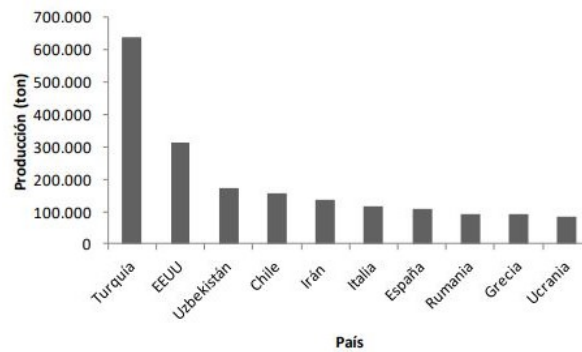


Figura 3.1.1: Producción de cerezas para los países más productores en 2018 [23].

La producción ha ido en aumento en los últimos años (ver Figura 3.1.2), lo que genera una gran oportunidad de estudio para los sistemas agrivoltaicos adaptados a este cultivo.

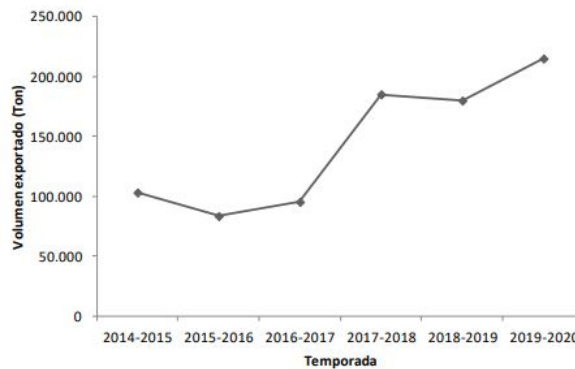


Figura 3.1.2: Producción en Chile de cerezas en los últimos años [23].

En cuanto a la variedad Regina, esta ocupa el tercer lugar entre las variedades de cereza con mayor exportación en Chile (año 2020).

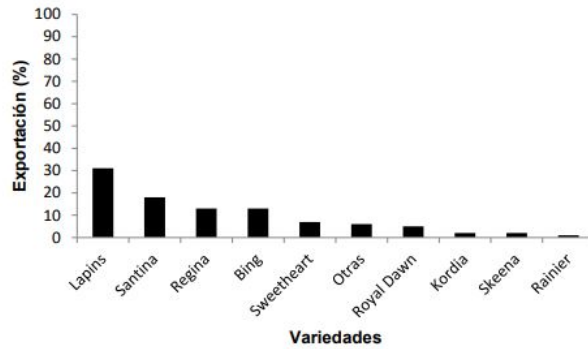


Figura 3.1.3: Exportación de Chile según variedad de cereza en temporada 2019-2020 [23].

La zona productiva se encuentra principalmente en la zona centro sur, donde destacan las regiones Libertador Bernardo O'Higgins y Maule.

Su producción se lleva a cabo en países que poseen climas templados con inviernos fríos. Dentro de los factores que afectan al crecimiento de este fruto se pueden nombrar características edafológicas, la acumulación de frío invernal, la acumulación térmica durante la temporada productiva, el daño por heladas tardías y por lluvias en primavera, la polinización y la incompatibilidad gametofítica [23]. En esta investigación se dejará fuera del alcance en cómo impacta el microclima al desarrollo del cultivo, pero en términos generales se encontró que se recomienda que los cerezos tengan entre 6 y 8 horas de luz [24],[25]. Además, un estudio encontró que bajo sombra se produce un 37% menos de biomasa en la cereza al reducir aproximadamente un 70% la radiación incidente [26] en una localidad en Suiza. En la Figura 3.1.4 se muestra que el comportamiento en la radiación en Suiza es similar a la de Chile.

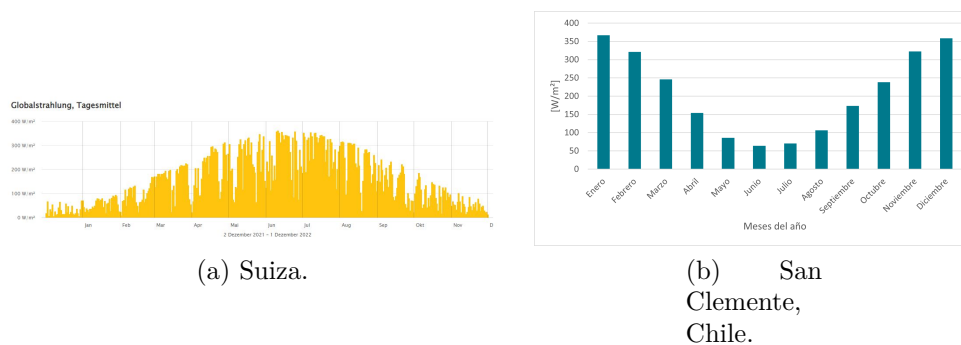


Figura 3.1.4: Comparación de radiación global en Chile y Suiza [27],[28].

Es importante destacar que este estudio no investiga proyectos agrivoltaicos, sino el efecto que trae el generar sombra (con un objeto no especificado) sobre el cerezo. Este estudio servirá más adelante para realizar una comparación.

El periodo de crecimiento del fruto de un cerezo (cereza) se considera en esta investigación entre el 25 de Septiembre y el 15 de Abril [29],[30],[31],[23], dentro del cual se considera las distintas etapas fenológicas de este fruto (ver Figura 3.1.5).



Figura 3.1.5: Etapas del estado fenológico de los cerezos [23].

Otro parámetro importante para esta investigación es la altura que puede alcanzar este árbol. Se encuentra que sin poda puede alcanzar los 4 metros, implicando que la altura depende del manejo específico en el campo agrícola.

De lo investigado, el rango de altura común, está entre 2,5 y 4 [m] [32],[33],[34],[35].

En cuanto a proyectos agrivoltaicos existentes aplicados a este cultivo, no fue posible encontrar información detallada más de que existe un proyecto en Japón y otro en desarrollo, donde una de las frutas de la plantación es la cereza, en Rhone Valley en Francia [36],[37].

3.2. Características de la localidad

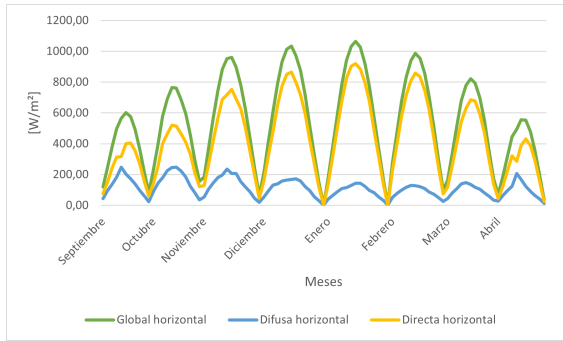
En la Tabla 3.2.1 se muestran las horas de amanecer, mediodía solar y atardecer para cada mes, mencionado en la sección anterior, para la localidad de San Clemente.

Tabla 3.2.1: Amanecer, mediodía solar y atardecer para el periodo de crecimiento de una cereza considerado, en San Clemente [38].

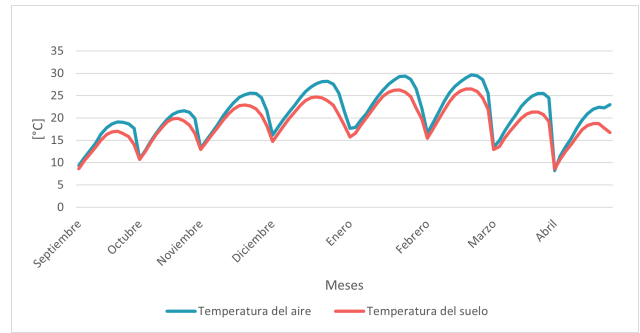
Mes	Amanecer	Mediodía solar	Atardecer
Septiembre	7:30 - 7:23	13:36	19:44 - 19:48
Octubre	7:21 - 6:43	13:33	19:50 - 20:16
Noviembre	6:42- 6:23	13:32	20:17 - 20:45
Diciembre	6:23 - 6:33	13:42	20:46 - 21:04
Enero	6:34 - 7:03	13:54	21:04 - 20:54
Febrero	7:05 - 7:32	13:59	20:54 - 20:25
Marzo	7:32 - 7:58	13:54	20:23 - 19:41
Abril (1/04-2/04)	7:59 - 8:00	13:50	19:38
Abril (3/04-15/04)	7:00 - 7:22	12:47	18:37 - 18:03

Como primera aproximación, se debe conocer las variables climáticas en esta zona. Esto

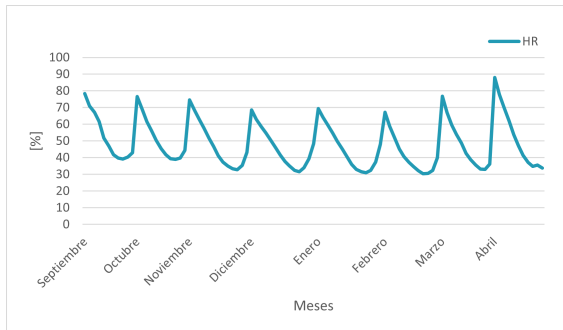
se muestra en la Figura 3.2.1.



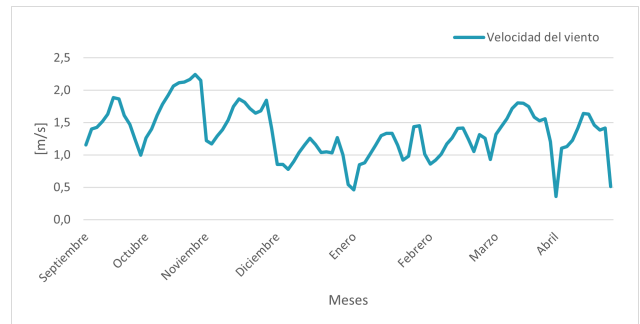
(a) Radiación.



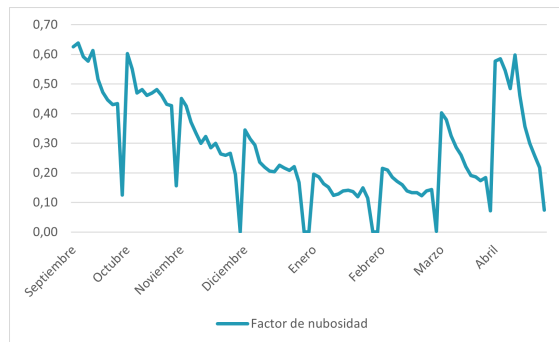
(b) Temperatura del aire y suelo.



(c) Humedad relativa del aire.



(d) Velocidad del viento.



(e) Nubosidad.

Figura 3.2.1: Factores climáticos por hora para cada mes dentro de la evaluación para la ubicación [27],[39].

Valores cercanos a 0 en la Figura 3.2.1.e indican claridad en los cielos y cercanos a 1 a la presencia de nubes.

Asimismo, es de utilidad para esta investigación la ocurrencia de precipitación en la zona (Figura 3.2.2).

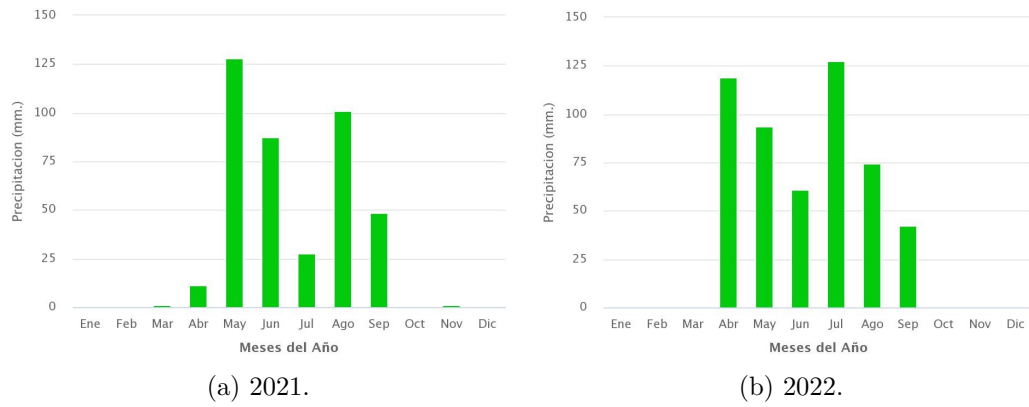


Figura 3.2.2: Precipitación por mes para los años 2021 y 2022 en San Clemente [40].

Para el año 2022, se generó una gran diferencia en el patrón de la precipitación frente a lo ocurrido el año anterior, no solo para esta localidad sino para todo el país. Es por esto que es difícil extrapolar un comportamiento, ya que los máximos y mínimos cambiaron de un año a otro.

En particular, se pudo acceder al histórico desde el año 2019 en la localidad, mostrada en la Figura 3.2.3.

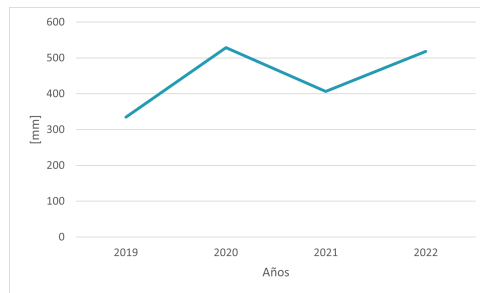


Figura 3.2.3: Historial de precipitación en San Clemente desde el año 2019 hasta el presente (considerando hasta los valores de Octubre) [40].

De aquí se puede extrapolar la inexistencia de un comportamiento claro, que no solo ocurre por mes sino que se presenta en los últimos años.

3.3. Diseño optimizado

Chasco [18] propuso el diseño de la Figura 3.3.1.

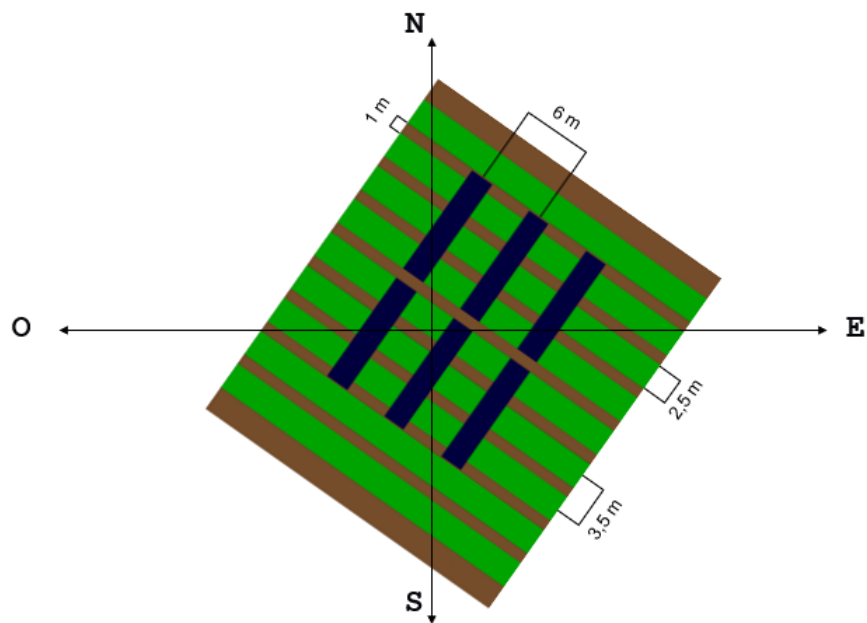


Figura 3.3.1: Diseño propuesto por Chasco para el proyecto [18].

Esta es una ilustración que representa la vista superior del terreno con los paneles fotovoltaicos en rectángulos azules y la zona cultivada de cerezos en rectángulos verdes. En la Figura 2.4.2.d se muestra el estilo que se presenta en este diseño propuesto.

Se plantea que existan 3 filas de correderas de paneles o strings, con 20 unidades en cada una, con una distancia de 6 metros entre ellas. Cada fila contiene a los paneles sin espacio entre ellos.

Se nota un espacio que separa a cada fila de paneles, pero se desconoce la medida exacta de esta. Se plantea en [18] que esta distancia es despreciable, por ende en el presente estudio no se considera su existencia.

En la zona con cerezos, los árboles están plantados en surcos y en cada fila de cerezos estos surcos están a 2 metros de distancia. Por otro lado, ya que la altura se encuentra entre 2,5 y 4 [m], se propone una altura en la plataforma de 3,5 [m].

Se decidió que la planta tenga la misma orientación que el cultivo (32° NE) por recomendación bibliográfica [18].

Para la selección de este diseño se consideró resultados en reducción de la radiación incidente y generación de electricidad. Así, el objetivo de diseño se centra en causar el menor daño posible al cultivo, pero al encontrar un equilibrio con la generación de energía. Para eso se simularon varios diseños variando en cantidad de paneles (número de filas y de paneles en ellas), distancias entre filas, con seguimiento solar o fijo y distintos modos de configuración.

Se simularon 2 modos de configuración. El primero alude a un seguimiento al movimiento del sol para todo el tiempo simulado (se simula de 7 a 15 hrs). El otro alude a un equilibrio

entre el seguimiento al sol y el impacto sobre el cultivo. Este propone que en enero en horas antes de las 11 y en junio antes de las 13, el panel cause la menor sombra posible y así la planta pueda realizar de manera óptima el proceso de fotosíntesis (esperando que estas horas sean suficientes para que el cerezo llegue al punto de saturación de luz) y en horas posteriores, que el panel tenga seguimiento al sol generando la mayor cantidad de electricidad y causando un efecto importante sobre el microclima en horas de alta temperatura.

El diseño óptimo encontrado corresponde a este último modo con las distancias ya mencionadas.

3.3.1. Tecnología fotovoltaica

Chasco [18] también seleccionó la tecnología fotovoltaica a utilizar en este proyecto. Esta corresponde a un panel monocristalino (Figura 3.3.2) y su selección se basó en la eficiencia de conversión, la cantidad de estos requerido para alcanzar una capacidad instalada cercana a 25 [kW] y los costos asociados.

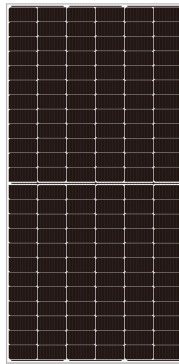


Figura 3.3.2: Panel fotovoltaico seleccionado [41].

En la Tabla 3.3.1 se puede ver las especificaciones técnicas de la tecnología escogida.

Tabla 3.3.1: Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico seleccionado [41].

Categoría	Valor
Tipo celda	Mono 166 x 83 [mm]
Largo	2,094 [m]
Ancho	1,038 [m]
Espesor	0,035 [m]
Área	2,17 [m^2]
Peso	23,5 [kg]

Además, este contará con un sistema de seguimiento al sol en su eje de elevación. El movimiento estará restringido entre los ángulos -60° y 60° .

Capítulo 4

Metodología

La investigación requerida para lograr los objetivos definidos en este documento, involucra la búsqueda sobre distintos conceptos para desarrollar los respectivos modelos y su fusión entre ellos.

En este capítulo se presentan los métodos de cálculo propuestos para la resolución de sombra generada por los paneles fotovoltaicos, la radiación incidente al suelo (para el caso sin y con sombra), la capacidad instalada del sistema fotovoltaico y la pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración del cerezo.

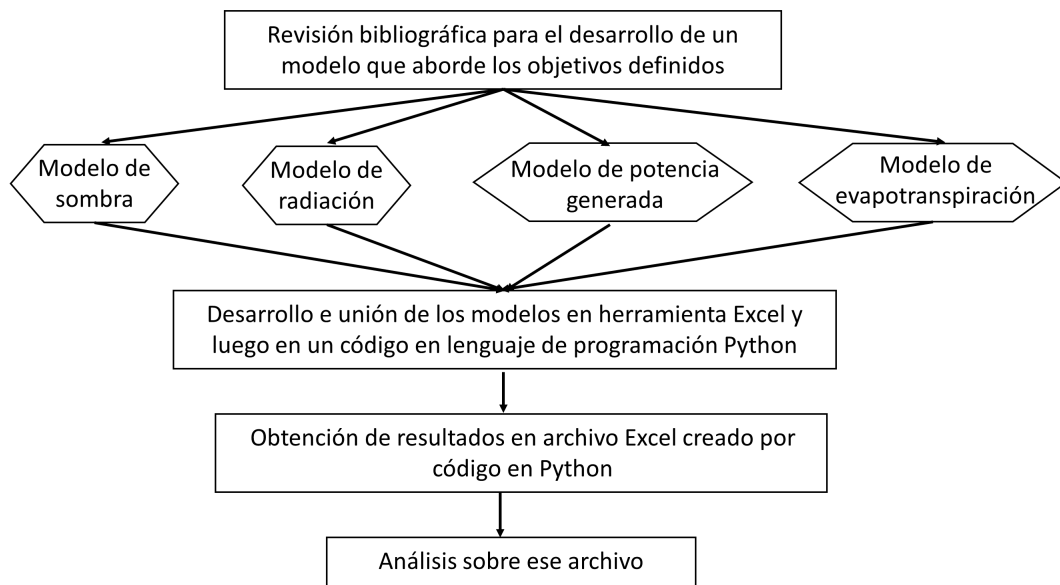


Figura 4.0.1: Diagrama de la metodología utilizada en esta investigación para la resolución.

En la Figura 4.0.1 se muestra la metodología desarrollada para abordar este trabajo y su resolución.

Este capítulo comienza con la definición de los parámetros de diseño del sistema fotovoltaico para continuar con cada modelo mencionado recién.

4.1. Parámetros de diseño

En este trabajo se consideran como parámetros de diseño a los que siguen:

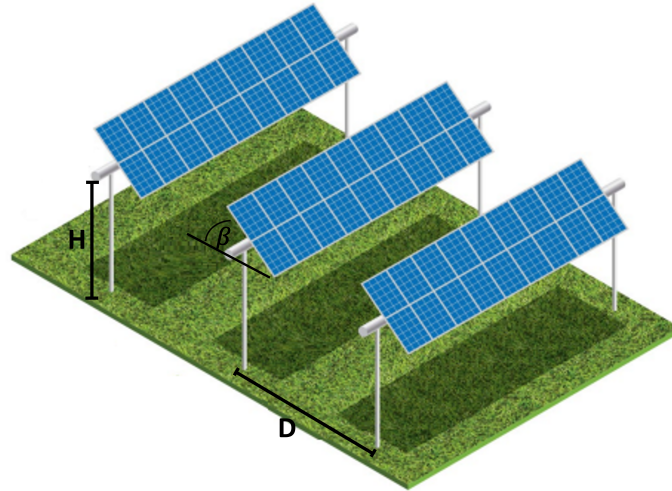


Figura 4.1.1: Parámetros de diseño del sistema fotovoltaico en un proyecto agrivoltaico [42].

- Altura de la plataforma, H .
- Distancia entre las filas de paneles, D . Estas se encuentran equiespaciadas.
- Modo de configuración. Este incide directamente en la orientación de cada panel (ángulo de elevación: β).
- Cantidad de filas, n_{filas} .
- Cantidad de paneles por cada fila, $n_{paneles}$. En la presente investigación se tomará igual valor para todas las filas.
- Ángulo de rotación del campo agrícola (ya definido en 32° NE).
- Dimensiones de cada fila. El ancho de cada fila (a_{fila}) será igual al largo de cada panel (ver Tabla 3.3.1) y el largo de cada fila dependerá del ancho del panel (ver Tabla 3.3.1) y de $n_{paneles}$.

4.1.1. Modos de configuración

Uno de los parámetros más importante tiene relación con el objetivo de diseño. En este trabajo se estudia el impacto sobre tres de estos, que en esta investigación se denominan modos de configuración.

El primero, denominado aquí, Sun Tracking, en donde se busca priorizar la maximización de generación de electricidad, provocando un impacto importante sobre el microclima.

El segundo, llamado aquí, Control Tracking a aquel con el objetivo de minimizar el impacto al cultivo, esto es minimizar la sombra y reducción de radiación incidente para priorizar la producción agrícola.

Finalmente, el modo de equilibrio CT/ST, el cual alude a una mezcla de los dos métodos anteriores con el fin de encontrar un equilibrio entre lo que le ocurre a la plantación y a la generación de electricidad.

Para el diseño de este último modo, se escoge ciertas horas en modo Control Tracking y las otras en Sun Tracking. Como ya se explicó, no es posible modelar el desarrollo del fruto a partir de la radiación, es por esta razón que la justificación de qué horas debe estar en cada modo es recomendado elegirlo luego de ver cómo reacciona el cultivo frente a los paneles solares con datos experimentales.

En este estudio se escoge utilizar el modo Control Tracking en las mañanas, ya que las plantas fotosintetizan más en estas horas al existir una temperatura del aire más baja (los estomas de la planta se encuentran abiertos). A medida que la temperatura ambiente empieza a aumentar, los estomas se van cerrando (método de protección de estas hacia altas temperaturas).

Chasco escoge para enero el cambio de hora a las 11 consiguiendo una suma de radiación global horizontal de $1.944 [W/m^2]$ hasta la hora nombrada y para junio a las 13 hrs, con $812 [W/m^2]$ [18].

Para extrapolar esta información al periodo evaluado en este trabajo, se mantuvo el horario de cambio de modo de enero (11 hrs) y en los meses cuando esto conseguía una radiación menor que $812 [W/m^2]$, se aumentaba el horario en modo Control Tracking hasta conseguir un valor no menor al nombrado (caso de septiembre y abril, quedando a las 12 hrs). Las horas seleccionadas se informan en la Tabla 4.1.1.

Tabla 4.1.1: Hora de cambio de modo Control Tracking (CT) a Sun Tracking (ST), para el modo de equilibrio CT/ST.

Mes	Hora de cambio de modo de CT a ST
Septiembre	12:00
Octubre	11:00
Noviembre	11:00
Diciembre	11:00
Enero	11:00
Febrero	11:00
Marzo	11:00
Abril	12:00

4.1.2. Distancia entre filas de paneles

La eficiencia de los paneles depende, entre otras cosas, del efecto de sombreado causado entre los mismos paneles o por otros objetos cercanos. En este caso no existe otro obstáculo entre los rayos solares y los paneles, más que estos mismos.

Debido a que en cada filas los paneles van uno al lado del otro, el único parámetro en donde se debe evaluar esto es en la distancia entre las filas de paneles.

De [43] se obtiene la Ecuación 4.1.1 para cuantificar la distancia mínima que debe existir entre cada fila de paneles.

$$D_{min} = a_{fila} \cdot \left[\frac{\text{sen}(\beta)}{\text{tan}(\alpha_s)} \cdot \cos(Z - Z_s) + \cos(\beta) \right] \quad (4.1.1)$$

Ya con los parámetros de diseño definidos y para facilitar la comprensión del presente trabajo, se presenta la Figura 4.1.2, en donde se puede observar el algoritmo a desarrollar con los modelos que se informarán a continuación.

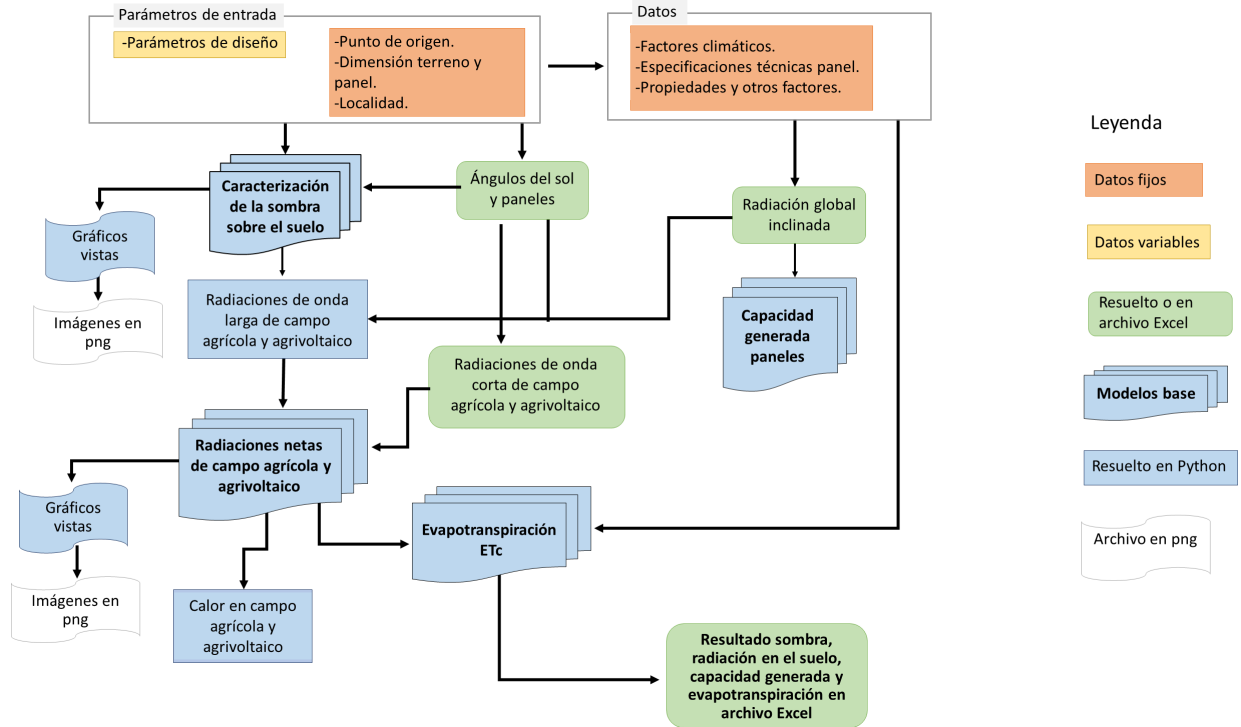


Figura 4.1.2: Diagrama de la metodología de resolución utilizado en esta investigación.

Se comienza con la selección de los parámetros de diseño y el ingreso de los distintos datos ya fijos (estos serán informados más adelante). El paso de tiempo escogido es obtener los distintos resultados por hora en todo el periodo de evaluación.

Hay distintos pasos que fueron resueltos en la herramienta Excel y que luego fueron ingresados al código en lenguaje de programación Python (de la leyenda de la Figura 4.1.2 se puede notar que pasos fueron resueltos según la herramienta).

Se comienza con la caracterización de la posición del sol y de cada fila de paneles en el espacio, para determinar la ubicación de las sombras generadas por cada una de estas filas. Esto último se realiza tanto con herramientas de Python como con métodos de cálculo que serán presentados en este capítulo.

Con el resultado listo se generan imágenes que ilustran distintas vistas de la planta y es posible calcular las áreas de cada fila de paneles.

Teniendo caracterizada esta ubicación se adentra al modelo de radiación. En este se ocupan métodos de cálculo (salvo para calcular el factor de visión para el cual se ocupa una librería de Python). La base de los cálculos fueron hechos en Excel y luego se obtiene la radiación neta incidente al suelo en el código en Python, dependiendo de si se evalúa un espacio sombreado o no. Se generan imágenes que ilustran la distribución de radiación en el suelo en una vista superior de la planta. Finalmente, se calcula el calor recibido por todo el terreno en este programa, utilizando los resultados en sombra.

Posteriormente se continúa con el modelo de capacidad o potencia generada por cada uno de los paneles, el cual involucra distintos cálculos que serán presentados en este capítulo.

En último lugar, se resuelve el cálculo de pérdida de agua mediante la evapotranspiración, la cual también posee su base calculada en Excel y se finaliza en Python. Este modelo también utiliza los resultados en sombra.

Con todos los modelos ya resueltos se crea un archivo Excel, desde el código en Python, el cual posee distintos resultados de cada modelo. Estos son los siguientes:

1. Fecha (hora, día y mes).
2. Área total de la sombra generada por las distintas filas.
3. Área no sombreada del terreno.
4. Porcentaje de área sombreada con respecto a todo el terreno.
5. Factor de visión entre el panel y el suelo.
6. Radiación de onda larga en espacio sombreado.
7. Radiación incidente al suelo en espacio sombreado.
8. Radiación incidente al suelo en espacio no sombreado.
9. Calor recibido en el terreno sombreado.
10. Calor recibido en todo el terreno de ensayo.
11. Calor recibido en todo el terreno de ensayo para un campo agrícola (sin paneles).
12. Evapotranspiración (ET_c) para el campo agrícola (sin sombra) en altura y volumen de agua.
13. Evapotranspiración (ET_c) para el terreno sombreado en altura de agua.
14. Evapotranspiración (ET_c) para el proyecto agrivoltaico en volumen de agua.
15. Capacidad generada por el sistema fotovoltaico.
16. Porcentaje de capacidad generada con respecto a la obtenida para el modo Sun Tracking (la cual es el máximo posible).

4.2. Modelo para el sombreadamiento

En esta sección se presenta la forma de cálculo utilizada para predecir la sombra que generan los paneles sobre el suelo para un tiempo y espacio determinado. Este cálculo requiere de distintos pasos previos.

Lo primero que se debe calcular es la posición del sol, la que se describe mediante sus respectivos ángulos, los que a su vez dependen de variables de tiempo y espacio. Luego, se requiere describir la posición de todos los paneles en el espacio (ubicación en el terreno, ángulo de elevación y azimut de su superficie). Finalmente, es posible calcular la sombra que genera cada vértice perteneciente a cualquier fila de paneles, sobre el terreno.

4.2.1. Posición del sol

Esta sección se basa en el trabajo de Kalogirou [44].

Antes de calcular los distintos ángulos, se debe obtener otras variables como la declinación solar. Este es el ángulo que se forma entre la línea planeta Tierra-sol y la proyección de esta línea en el plano ecuatorial. Así, la declinación norte se considera positiva y la declinación sur negativa.

Debido a la utilización de Excel para estos cálculos, se necesita los ángulos en radianes. Es por esto que se escogieron ecuaciones para esta unidad de medida, en caso contrario, se utiliza la herramienta de Excel para la conversión de grados a radianes.

Mediante la fórmula de Spencer se obtiene la declinación, δ , en radianes:

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cdot \cos(\Gamma) + 0,070257 \cdot \sen(\Gamma) - 0,006758 \cdot \cos(2\Gamma) \\ & + 0,000907 \cdot \sen(2\Gamma) - 0,002697 \cdot \cos(3\Gamma) + 0,00148 \cdot \sen(3\Gamma) \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

Γ es el ángulo de día en radianes y se calcula con la Ecuación 4.2.2.

$$\Gamma = \frac{2\pi \cdot (N - 1)}{365} \quad (4.2.2)$$

Donde N es el día del año. Por ejemplo, el día 1 de Enero sería $N=1$ y el día 31 de Diciembre (para el año 2021) sería $N=365$.

Por otro lado, se requiere del ángulo horario, h . Este es el ángulo a través del cual el planeta giraría para llevar el meridiano del punto directamente bajo el sol [44] y se calcula en grados mediante la Ecuación 4.2.3.

$$h = (AST - 12) \cdot 15 \quad (4.2.3)$$

Donde AST (Apparent Solar Time) es el tiempo solar aparente y se obtiene de la Ecuación 4.2.4.

$$AST = \frac{LST + ET \pm 4 \cdot (SL - LL) - DS}{60} \quad (4.2.4)$$

AST se encuentra en horas, LST es el tiempo local estándar (por ejemplo, si se está evaluando para un día a las 8 horas, LST sería 480 min), ET es la ecuación del tiempo (Ecuación 4.2.5), SL es la longitud estándar (Ecuación 4.2.7), LL es la longitud de la localidad en grados (ver Tabla 3.0.1) y DS (Daylight Saving Time) es el factor relacionado al horario de verano. Si se está evaluando para un tiempo dentro del horario de verano (del 10 de Septiembre al 2 de Abril en Chile) este valor toma 60 min, en el caso contrario toma valor 0.

$$ET = 9,8 \cdot \sen(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sen(B) \quad (4.2.5)$$

$$B = \frac{(N - 81) \cdot 360}{364} \quad (4.2.6)$$

En la Ecuación 4.2.6, B está en grados.

$$SL = zona\ horaria \cdot 15 \quad (4.2.7)$$

Para el caso de Chile, $SL=60^\circ$ y el término $4 \cdot (SL - LL)$ es sumado a la ecuación, debido a que Chile se encuentra en longitud Oeste (para longitudes al Este, el término se resta). Si se ocupa esta lógica, no se debe considerar el signo de SL y LL al restarse.

Con estas variables definidas, se puede comenzar con el cálculo de los ángulos del sol.

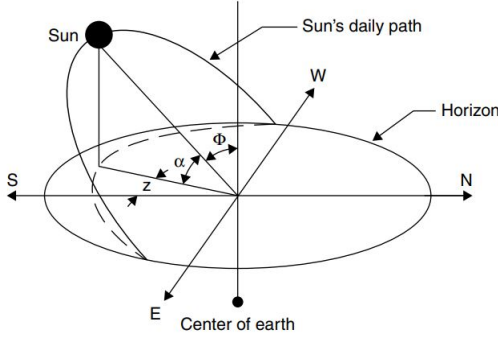


Figura 4.2.1: Ángulos del sol [44].

4.2.1.1. Ángulo de altitud solar

La altitud solar, α_s , es el ángulo que se forma entre los rayos del sol y el plano horizontal, como se puede ver en la Figura 4.2.1.

Este se obtiene en grados mediante la Ecuación 4.2.8.

$$\alpha_s = \text{sen}^{-1} [\text{sen}(L) \cdot \text{sen}(\delta) + \text{cos}(L) \cdot \text{cos}(\delta) \cdot \text{cos}(h)] \quad (4.2.8)$$

Donde L es la latitud de la localidad (ver Tabla 3.0.1) y aquí sí se considera el signo.

4.2.1.2. Ángulo cenital solar

Como se puede observar en la Figura 4.2.1, el ángulo cenital del sol (Φ) es aquel formado entre la vertical y los rayos del sol.

$$\Phi = 90^\circ - \alpha_s \quad (4.2.9)$$

En la Ecuación 4.2.9, el ángulo resulta en grados.

4.2.1.3. Ángulo azimut solar

El ángulo azimut, Z , es el formado por la proyección de los rayos del sol en el plano horizontal medido desde el sur hacia el norte para el hemisferio norte o del norte hacia el sur para el hemisferio sur. En la Figura 4.2.1 se toma el caso del hemisferio norte.

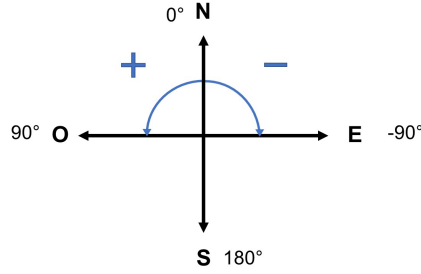


Figura 4.2.2: Sistema de referencia para el azimut solar de Kalogirou.

$$Z' = \text{sen}^{-1} \left[\frac{\cos(\delta) \cdot \text{sen}(h)}{\cos(\alpha_s)} \right] \quad (4.2.10)$$

Si se cumple la restricción $\cos(h) > \frac{\tan(\delta)}{\tan(L)}$, se ocupa la Ecuación 4.2.10. En caso contrario, que ocurre cuando el sol se encuentra detrás de la línea este-oeste, se ocupa la Ecuación 4.2.11.

$$Z = \begin{cases} -\pi + |Z'| & \text{para el amanecer hasta el mediodía solar} \\ \pi - |Z'| & \text{para el mediodía solar hasta el atardecer} \end{cases} \quad (4.2.11)$$

4.2.2. Posición de los paneles

Para describir la ubicación de cada panel en el espacio, se requiere de un punto de origen arbitrario, el ángulo de elevación (β) y el azimut del panel (32° NE).

Como se discutió en la Sección 3.3.1, el sistema fotovoltaico tendrá un sistema de seguimiento en solo en un eje (el de elevación del panel). Para conocer este ángulo se debe saber en qué configuración se está operando junto con las variables de tiempo (hora, día y mes).

Como ya se mencionó, se tiene tres configuraciones a evaluar, a continuación se detalla su método de cálculo.

4.2.2.1. Modo Sun Tracking

Al diseñar el sistema en función de la producción de electricidad, el objetivo es seguir el movimiento del sol tal que el ángulo formado entre la normal a la superficie del panel y los rayos del sol sea el mínimo. Este es el ángulo de incidencia (θ).

Hay que mencionar que el seguimiento será con respecto al eje horizontal norte-sur con seguimiento al sol de este a oeste (ver Figura 4.2.3).

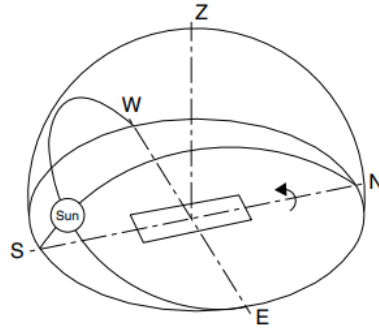


Figura 4.2.3: Seguimiento solar [44].

Para este seguimiento, el ángulo de elevación se calcula como sigue [44].

$$\beta = \tan^{-1}[\tan(\Phi) \cdot \cos(Z_s - Z)] \quad (4.2.12)$$

Donde Z_s es el ángulo de azimut de la superficie, el cual es la dirección normal al eje de rotación del panel.

Hay varias formas de interpretar esta fórmula, pero en este caso, debido a que el eje de rotación está desplazado en 32° hacia el noreste, se considera $Z_s = -122^\circ$. Esto es considerando el sentido de referencia de la Figura 4.2.2.

Cuando β comienza a entregar valores negativos, esto indica que su dirección normal no debe estar hacia el Este, sino que al oeste por la posición del sol. De esta manera, valores positivos indican una inclinación hacia el este y valores negativos hacia el oeste, como se observa en la Figura 4.2.4.

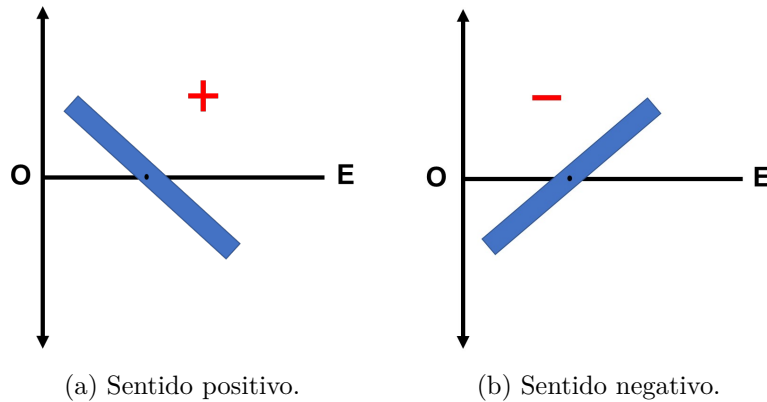


Figura 4.2.4: Sentido para la elevación del panel.

El ángulo de incidencia para este modo se calcula con la Ecuación 4.2.13 (en grados).

$$\begin{aligned} \theta = \cos^{-1} & [\text{sen}(L) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\beta) - \cos(L) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(Z_s) \\ & + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \cdot \cos(\beta) + \text{sen}(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(Z_s) \\ & + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(h) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(Z_s)] \end{aligned} \quad (4.2.13)$$

4.2.2.2. Modo Control Tracking

Este modo pretende causar el menor impacto por parte de los paneles fotovoltaicos al cultivo generando la menor cantidad de sombra posible. Esto es, seguir el recorrido del sol tal que los rayos sean paralelos a la superficie del panel.

Esto se logra al tener una elevación igual al ángulo de elevación del sol.

$$\beta = \alpha_s \quad (4.2.14)$$

De esta forma, el ángulo de incidencia se está maximizando. Este último se calcula con la ecuación que sigue [45]:

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(\beta) \cdot \cos(\Phi) + \sin(\beta) \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(-Z + Z_s)] \quad (4.2.15)$$

Al método de cálculo de Perna [45] (base de la Ecuación 4.2.15) se le realiza ciertas modificaciones para ajustar los sentidos considerados para este estudio en el ángulo de azimut.

4.2.2.3. Modo de equilibrio CT/ST

Finalmente, para este modo, simplemente se selecciona los ángulos calculados anteriormente según la hora (ver Tabla 4.1.1). Por ejemplo, para un día cualquiera de octubre los paneles se encuentran en modo Control Tracking para las horas comprendidas antes de las 11 hrs siendo caracterizado por β y θ de ese modo y, luego de esas horas en modo Sun Tracking con sus respectivos ángulos.

4.2.3. Posición de la sombra

Con la posición del sol y de los paneles ya caracterizados, se puede obtener la sombra en el terreno generado por estos dispositivos.

Los paneles no estarán fijos en una posición, sino que esta dependerá de la hora, día, mes y modo de configuración. Por consiguiente, se necesita de un método de cálculo que vaya rotando la posición de estos. La metodología para calcular esto comienza con caracterizar los vértices de cada fila de paneles, como el punto O de la Figura 4.2.5.

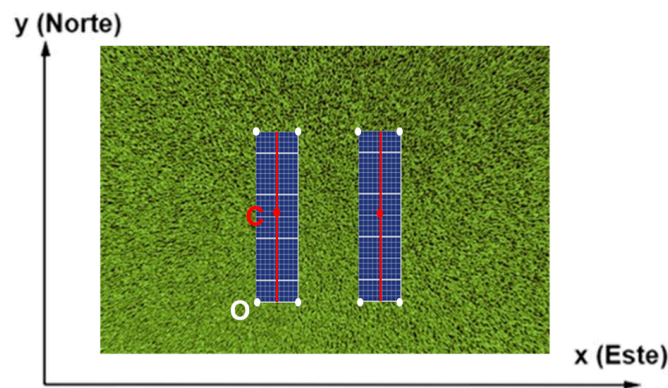


Figura 4.2.5: Concepto puntos de origen de cada fila de paneles.

Luego, se le aplica la Ecuación 4.2.16 [46].

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-32^\circ) & -\text{sen}(-32^\circ) & 0 \\ \text{sen}(-32^\circ) & \cos(-32^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \text{sen}(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_o - x_c \\ y_o - y_c \\ z_o - z_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} \quad (4.2.16)$$

Esta es una fórmula de rotación (en el ángulo azimut y de elevación de paneles) que se hace con respecto al centroide de cada fila de paneles o la línea que pasa por los centroides de cada uno de los paneles de una misma fila (punto C o línea roja de la Figura 4.2.5, que en un proyecto real se vería como la barra de la Figura 4.2.6).



Figura 4.2.6: Ilustración de una planta agrivoltaica que muestra la barra en torno a la cual rota una fila de paneles [47].

Este método de cálculo considera los mismos sentidos en los ángulos considerados en esta investigación, por lo que se mantuvo como se proponía en [46].

Así, se obtiene un punto P ya rotado a partir de un punto original O.

El punto P se describe con las coordenadas x_p , y_p y z_p , el punto C con x_c , y_c y z_c y el punto S con x_s , y_s y z_s .

Con este cálculo listo se puede obtener la sombra en el suelo (punto S) generada por este punto P perteneciente a un panel, siguiendo la lógica ilustrada en la Figura 4.2.7.

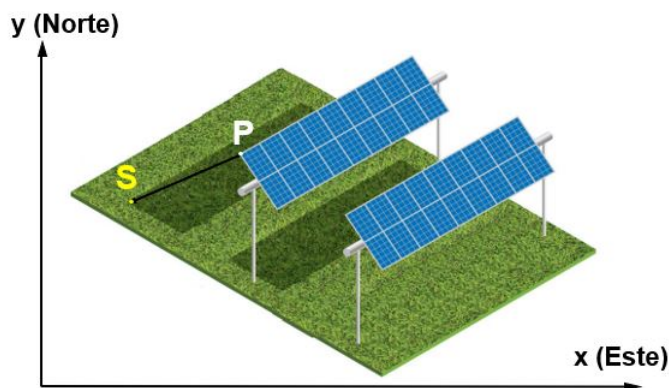


Figura 4.2.7: Concepto de proyección de sombra [42].

Para el desarrollo de este modelo se considera que el panel es 100% opaco, con espesor despreciable (objeto 2D) y que el suelo es uniforme en su elevación.

Se ocupa las relaciones de [48] mostradas en las Ecuaciones 4.2.17 y 4.2.18.

$$x_s = \frac{z_p}{\tan(\alpha_s)} \cdot \text{sen}(-Z + 180) + x_p \quad (4.2.17)$$

$$y_s = \frac{z_p}{\tan(\alpha_s)} \cdot \text{cos}(-Z + 180) + y_p \quad (4.2.18)$$

Donde la posición de S se describe con las coordenadas x_s e y_s ($z_s=0$ por estar en el suelo).

Se le realiza una modificación a lo propuesto en [48], debido al sentido del ángulo azimut tomado en este estudio. Al término se le toma en negativo y se le suma 180° para que quede midiendo desde el sur hacia el oeste en positivo y en caso contrario en negativo.

En [48] se calculó el porcentaje de error para diferentes alturas en la plataforma y diferentes dimensiones en el panel, para el caso de panel plano con el sol en el cenit.

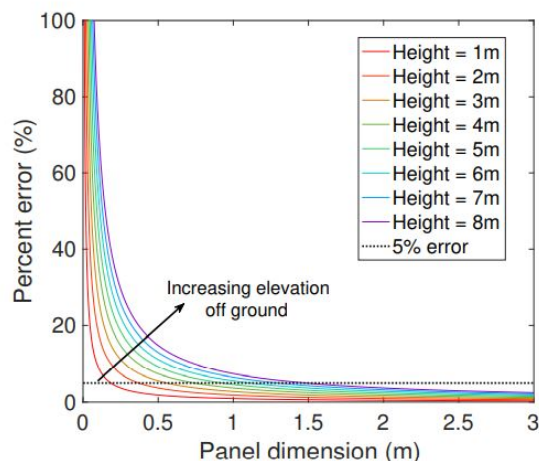


Figura 4.2.8: Error obtenido para diferentes alturas y dimensiones en el panel para el trabajo de [48].

En la Figura 4.2.8 se observa que, para todas las dimensiones del panel consideradas, el error se mantiene en un 5%. Por otro lado, el error aumenta con la elevación del panel, lo cual es algo esperado.

En este caso se ocupa un panel de dimensiones 1,038 x 2,094 [m], pero siendo este último valor el ancho de la plataforma. De la Figura 4.2.8 se nota un valor muy bajo para estas dimensiones.

En definitiva, este es un modelo con el cual se espera obtener resultados bastante certeros.

4.3. Modelo de radiación sobre el suelo

Con el espacio en el terreno afectado por la sombra ya caracterizado, se puede entrar en el estudio de la radiación incidente tanto en esta zona como en la zona no sombreada.

Como fue informado, este es el parámetro con mayor variación y relevancia dentro del microclima entre los paneles fotovoltaicos y el cultivo.

En la presente sección se propone un modelo de método de cálculo enfocado en la radiación incidente al suelo para zonas no sombreadas (utilizado para la caracterización del campo agrícola y para las zonas donde no llegan la sombra generada por los paneles en un proyecto agrivoltaico) y para las sombreadas (causadas por los paneles en un proyecto agrivoltaico).

Para el caso agrivoltaico se propone una caracterización en la radiación de la forma estipulada en la Figura 4.3.1, salvo que para esta investigación no existirá un matiz entre la zona sombreada y la que no está sombreada. Es decir, habrán solo dos valores en radiación que llegaran a los suelos del proyecto agrivoltaico.

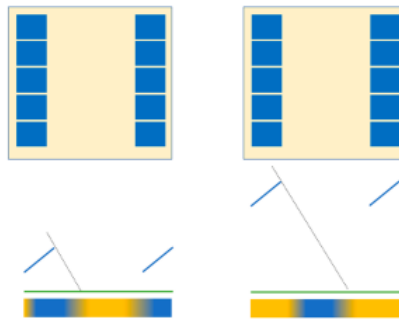


Figura 4.3.1: Distribución de radiación incidente al suelo en caso agrivoltaico [20].

4.3.1. Suelo sin sombra

La radiación neta entrante al suelo es la suma de la radiación entrante y saliente de onda corta y la radiación entrante y saliente de onda larga.

La radiación de onda corta es la conocida radiación solar. Para el caso sin sombreadamiento en el terreno, esta viene descrita por el albedo del suelo, α (porcentaje de radiación que es

reflejada por la superficie), y la radiación global horizontal, I_{GH} , en $[W/m^2]$ (Ecuación 4.3.1).

$$R_{oc} = (1 - \alpha) \cdot I_{GH} \quad (4.3.1)$$

La radiación de onda larga o térmica se describe mediante la ley de Stefan-Boltzmann, la cual alude a la transferencia radiativa entre dos superficies. En este caso, como se plantea en la Ecuación 4.3.2, entre el suelo y el cielo.

$$R_{ol} = \varepsilon_{at} \cdot \sigma \cdot (T_a + 273,15)^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273,15)^4 \quad (4.3.2)$$

ε_{at} es la emisividad atmosférica, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} [W/m^2 K^4]$), T_a es la temperatura del aire en $[^\circ C]$, ε_s es la emisividad del suelo que depende de la localidad y T_s es la temperatura del suelo en $[^\circ C]$.

A lo largo de este documento las temperaturas serán manejadas en $[^\circ C]$ y serán convertidas a $[^\circ K]$ cuando lo requieran, sumando 273,15.

Finalmente, la radiación neta al suelo resulta en la Ecuación 4.3.3.

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot I_{GH} + \varepsilon_{at} \cdot \sigma \cdot (T_a + 273,15)^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273,15)^4 \quad (4.3.3)$$

Para la emisividad atmosférica se utiliza la Ecuación de Brutsaert [49]:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{aire} \cdot \phi_e \quad (4.3.4)$$

Según investigaciones, la precisión en el resultado de radiación de onda larga depende principalmente de los valores tomados en la emisividad del aire. Para esta, existen muchas formas de cálculo, pero la precisión del resultado depende de la localidad (condiciones climáticas, principalmente temperatura del aire y humedad relativa). Como este estudio se utilizará en un contexto agrónomo es que se escoge utilizar la Ecuación de Brutsaert (muy utilizada en este contexto) con la emisividad del aire como en la Ecuación 4.3.5.

$$\varepsilon_{aire} = \left(\frac{e_a}{(T_a + 273,15)} \right)^{1/7} \quad (4.3.5)$$

Donde e_a alude a la presión real de vapor del aire [KPa] y ϕ_e un coeficiente empírico. Es en esta última variable donde se consideran los factores climáticos. En virtud de que es un factor empírico, se decide utilizar $\phi_e = 1,75$, valor encontrado para Pencahue (a 23,38 km de la localidad del presente estudio) obtenido entre las 9 y 18 hrs. Esto se encuentra, generalmente, en el rango de este estudio.

Para la presión del aire se tiene la Ecuación 4.3.6 [19].

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{HR}{100} \cdot e^o(T_a) \\ &= \frac{HR}{100} \cdot 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,269 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right) \end{aligned} \quad (4.3.6)$$

Donde HR es la humedad relativa del aire que se mide en % y $e^o(T_a)$ la presión de satu-

ración de vapor a la temperatura ambiente en [KPa].

De lo investigado, el valor del albedo del suelo tiene un amplio rango (0,02 a 0,45), repercutiendo de manera importante en los resultados. Es por esto, que se escoge utilizar el valor propuesto en [49]. Un valor de 0,15 es para días despejados y 0,18 para días nublados. Se decide tomar un valor promedio en función de la nubosidad de la zona (Figura 3.2.1.e), quedando $\alpha=0,17$.

En la investigación para Pencahue, con estos valores para albedo y emisividad atmosférica y asumiendo una temperatura del suelo igual a la temperatura del aire (esto no es asumido en el presente estudio), se obtuvo un error en los resultados de un 2% y 3% para los valores cada 30 minutos y diarios, respectivamente.

Para la emisividad del suelo se considera que el tipo de suelo de la zona es “*dark clay wet*” gracias a [50] resultando en $\varepsilon_s=0,97$ [51]. Al contrario que α y ε_{at} , este no tiene un amplio rango en su valor (varía entre 0,9 a 0,98).

4.3.2. Suelo con sombra

Al agregar paneles al terreno, se genera sombra sobre ciertos sectores del terreno a nivel de los cultivos y suelo. En este informe se estudiará solo a nivel de suelo.

Esta integración cambia los niveles de radiación incidente en todo el terreno. Pero el cambio, en zonas donde no se genera sombra puede estar asociado al factor de visión y este último depende de varios factores (en la Sección 4.3.2.3 se discute). Debido a lo complejo que puede ser estudiarlo, en este modelo solo se calcula la variación en radiación neta incidente en las zonas sombreadas para un proyecto agrivoltaico.

El primer cambio está asociado al cálculo de radiación de onda corta. La radiación directa al encontrarse con el panel fotovoltaico como obstáculo provoca la generación de sombra sobre el terreno, así solo la radiación difusa (I_d) es capaz de alcanzar estos puntos [52]. De esta forma, la radiación de onda corta queda descrita en la Ecuación 4.3.7.

$$R_{oc} = (1 - \alpha) \cdot I_d \quad (4.3.7)$$

El segundo cambio viene asociado a la radiación térmica. Para este caso se debe agregar la transferencia radiativa entre el suelo y el panel fotovoltaico [53]. La radiación térmica para este caso queda planteada en la Ecuación 4.3.8.

$$R_{ol} = \varepsilon_{at} \cdot \sigma \cdot (T_a + 273,15)^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273,15)^4 + \varepsilon_{panel,suelo} \cdot \sigma \cdot [(T_p + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4] \cdot FV_{panel,suelo} \quad (4.3.8)$$

$\varepsilon_{panel,suelo}$ es la emisividad entre el panel y el suelo, T_p es la temperatura de la parte trasera del panel en [°C] y $FV_{panel,suelo}$ es el factor de visión entre la parte trasera del panel y el suelo.

Así, la radiación neta incidente a un suelo sombreado queda:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot I_d + \varepsilon_{at} \cdot \sigma \cdot (T_a + 273,15)^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273,15)^4 + \varepsilon_{panel,suelo} \cdot \sigma \cdot [(T_p + 273,15)^4 - (T_s + 273,15)^4] \cdot FV_{panel,suelo} \quad (4.3.9)$$

Es importante indicar que en este caso el valor del albedo se mantiene constante en todo el periodo de evaluación y que además, se utilizan los mismos valores para la emisividad del suelo, emisividad atmosférica, temperatura del aire, temperatura del suelo, velocidad del viento y humedad relativa; que en el caso sin paneles. Estos valores deberían variar (algunos más significativamente y/o con mayor impacto en el resultado). Por ejemplo, en la Figura 4.3.2 se puede ver la real variación del albedo del suelo por hora para el estudio sobre Pencahue.

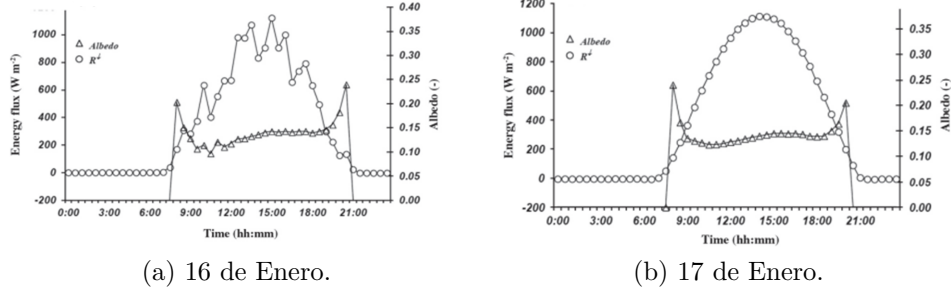


Figura 4.3.2: Variación horaria en el albedo para la localidad de Pencahue en dos días de enero con distintos comportamientos [49].

La variación generada por la instalación de los paneles sobre los parámetros mencionados anteriormente, no tiene formas de cálculo teórico sencillas que muestren este efecto.

A continuación, se presenta las ecuaciones para las variables que falta abordar de la Ecuación 4.3.8.

4.3.2.1. Emisividad del suelo

Para la $\varepsilon_{panel,suelo}$ se utiliza la Ecuación 4.3.10 [52].

$$\varepsilon_{panel,suelo} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_s} - 1} \quad (4.3.10)$$

ε_p es la emisividad del panel y se utiliza $\varepsilon_p=0,85$ [54].

4.3.2.2. Temperatura del panel

Para la temperatura trasera del panel se utiliza la correlación propuesta en [55].

$$T_p = T_a + 0,022 \cdot I_{GI} - \left(\frac{I_{GI}}{1000} \right)^3 \quad (4.3.11)$$

I_{GI} es la radiación global inclinada que llega a la parte superior del panel en $[W/m^2]$. En la Sección 4.4.1 se discute su cálculo.

4.3.2.3. Factor de visión

El factor de visión es un factor geométrico que considera los efectos de la orientación de las superficies en la transferencia de calor, como muestra la Figura 4.3.3.

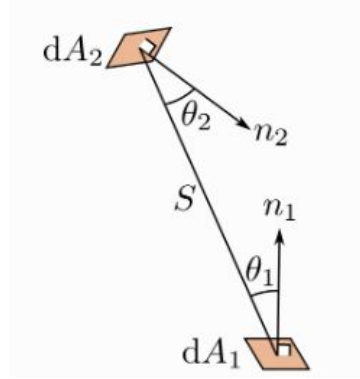


Figura 4.3.3: Parámetros involucrados en el cálculo de factor de visión [56].

Así, el factor de visión de la superficie 1 a 2 se define en la Ecuación 4.3.12.

$$FV_{1-2} = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos(\theta_2) \cdot \cos(\theta_1)}{\pi \cdot S^2} dA_2 dA_1 \quad (4.3.12)$$

Notar que esta depende del área de cada superficie, distancia y ángulos entre ellos.

Para resolver esta compleja ecuación se usa *pvfactors*, una librería de Python a la cual se le debe ingresar el ángulo de rotación del campo agrícola (32° NE), el ángulo de elevación del panel (β), el ángulo azimut de la superficie (Z_s), el ángulo azimut y cenital del sol (Z y Φ), la altura de la plataforma (H), el ancho de cada fila de paneles (a_{fila}), el *gcr* (Ground Coverage Ratio) definido como la división entre el ancho del panel y la distancia entre filas (D) [57].

Los ángulos azimut tienen otro sistema de referencia. Por eso, el azimut del eje de rotación para este cálculo -32° (32° NE) será igual a 32° y para el azimut del sol lo mismo, $Z_{FV} = -Z$.

La metodología aquí es calcular el factor de visión entre una fila de paneles y el suelo, y luego asumir este resultado para todas las filas.

Si bien el resultado puede cambiar al tomar en cuenta a todas las filas de paneles, se notó complejo automatizar el proceso para que sea independiente de la hora y el modo de configuración.

Finalmente, también se puede considerar los resultados en potencia térmica, es decir, el calor entregado al suelo al considerar las áreas respectivas, en [W].

$$Q_{total,agrícola} = R_{n, sin\ sombra} \cdot A_{total} \quad (4.3.13)$$

$$Q_{total,agrivoltaico} = R_{n, sin\ sombra} \cdot (A_{total} - A_{sombra}) + R_{n, con\ sombra} \cdot A_{sombra} \quad (4.3.14)$$

4.4. Modelo para la potencia generada

En esta sección se propone el método de cálculo para obtener la capacidad instalada del sistema fotovoltaico.

No se incluye el efecto de sombreado sobre estos dispositivos ni la reducción de eficiencia debido al efecto de polvo acumulado sobre los paneles. El primer efecto se discute con los resultados en las distancias calculadas de las filas y para el último, se recomienda una planificación periódica en su limpieza.

La potencia generada por el sistema fotovoltaico viene definido por la Ecuación 4.4.1 [58].

$$P_{out} = I_{GI} \cdot A_p \cdot n_{paneles} \cdot n_{filas} \cdot \eta_{oc} \quad (4.4.1)$$

Donde A_p es el área de un panel obtenido de la Tabla 3.3.1, $n_{paneles}$ el número de paneles por cada fila, n_{filas} el número de filas de paneles, η_{oc} la eficiencia de conversión del panel en condiciones de operación en % y P_{out} queda en [W].

A continuación, se plantea las fórmulas para cada variable.

4.4.1. Radiación global inclinada

Se comienza con el cálculo de la radiación global inclinada que le llega al panel fotovoltaico. Para este existe una amplia literatura y todo indica a una mayor precisión en los modelos anisotrópicos. Se escoge el modelo de Hay-Davies [59] por su mayor sencillez entre este tipo de modelo.

Así I_{GI} queda descrita como la suma de la radiación directa inclinada (I_{bi}) y la radiación difusa inclinada (I_{di}), ambas en [W/m^2]. Las relaciones de cada una de estas se presenta en las Ecuaciones 4.4.2 y 4.4.3.

$$I_{bi} = I_b \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(Z)} \right) \quad (4.4.2)$$

$$I_{di} = I_d \left[f_H \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(Z)} \right) + \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \cdot (1 - f_H) \right] \quad (4.4.3)$$

Donde I_b es la radiación directa horizontal, I_d es la radiación difusa horizontal y f_H es el factor de claridad (*clearness*). $f_H = 1$ indica que el día está despejado y $f_H = 0$ que el día está nuboso.

Así la Ecuación queda como sigue.

$$I_{GI} = I_b \cdot \frac{\cos(\theta)}{\cos(Z)} + I_d \cdot \left[f_H \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{\cos(Z)} \right) + \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) \cdot (1 - f_H) \right] \quad (4.4.4)$$

4.4.2. Eficiencia de conversión

A su vez, la eficiencia se calcula como sigue:

$$\eta_{oc} = \eta_{STC} \cdot [1 - \beta_{STC} \cdot (T_{cel} - T_{STC})] \quad (4.4.5)$$

T_{STC} , η_{STC} y β_{STC} es la temperatura en [°C], eficiencia y coeficiente de temperatura de la potencia de salida máxima bajo STC (standard test conditions), respectivamente. Estos parámetros dependen del modelo del panel, por lo que se pueden obtener de la especificación técnica proveída por el vendedor. En este caso, se encuentran en la Tabla 4.4.1.

Por otro lado, T_{cel} es la temperatura de la celda del panel en [°C] y se calcula mediante la fórmula de Skoplaki [60].

$$T_{cel} = T_a + \frac{I_{GI}}{I_{NOCT}} \cdot (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \cdot \frac{h_{w,NOCT}}{h_w} \cdot \left[1 - \frac{\eta_{STC}}{\tau \cdot \alpha_a} \cdot (1 - \beta_{STC} \cdot T_{STC}) \right] \quad (4.4.6)$$

De [60] se demostró que los modelos que incluyen la variable de velocidad del viento obtuvieron mayor precisión en la temperatura para un panel. En específico, el método de Skoplaki dio mejores resultados para un panel monocristalino (el tipo que se estudia aquí) en Italia. Por esta razón se decide utilizar esta fórmula de cálculo.

T_{NOCT} , $T_{a,NOCT}$, I_{NOCT} y $h_{w,NOCT}$ son la temperatura de la celda [°C], temperatura del aire [°C], radiación [W/m^2] y coeficiente de convección del viento bajo NOCT (Nominal operating cell temperature), respectivamente. Estos valores se encuentran en la Tabla 4.4.1.

Se utiliza la Ecuación 4.4.7 para el cálculo del coeficiente de convección del viento.

$$h_w = 5,7 + 2,8 \cdot v \quad (4.4.7)$$

v es la velocidad del viento en [m/s]. Para el cálculo de $h_{w,NOCT}$ se usa la velocidad dada en la Tabla 4.4.1 y para el otro caso se utiliza la velocidad del viento dependiendo del tiempo y día.

Por otro lado, τ es la transmitancia del sistema de cobertura y α_a el coeficiente de absorción de la celda. Estos factores definen la eficiencia óptica del panel. Existen formas de cálculo para este valor, pero se requiere del coeficiente global de pérdida de calor y este dato no se pudo obtener de la especificación técnica. Es por esto que se asume un valor $\tau\alpha_a = 0,9$ [60].

Tabla 4.4.1: Datos técnicos del panel [41].

Parámetro	Valor
T_{NOCT} [°C]	45
$T_{a,NOCT}$ [°C]	20
I_{NOCT} [W/m ²]	800
v_{NOCT} [m/s]	1
β_{STC} [%/°C]	-0,35
T_{STC} [°C]	25
η_{STC} [%]	20,24

4.5. Modelo para evapotranspiración

Finalmente, en esta sección se aborda el último modelo a utilizar para el cálculo de pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración para el cerezo.

Como bien se menciona en la Sección 2.2.1, la evapotranspiración alude a dos procesos. Si bien estos pueden tener una relación, investigadores [61] proponen que el mejor método de cálculo es considerarlos por separado. La desventaja es que estos cálculos requieren de valores experimentales en ciertas variables ligadas a las condiciones de manejo del cultivo, el tipo de suelo y características de cada cultivo. No es posible obtener estos valores para la presente investigación, por lo que se ocupa una forma de cálculo que considera a la evapotranspiración como un solo proceso y ecuación. Este método se le conoce como la ecuación de FAO Penman-Monteith [19].

Se mostró en [61] que, para cerezos cultivados en China, el error promedio para Penman-Monteith fue de un 19 % y para Shuttleworth–Wallace (método que separa los procesos) 12 %. Lo que entrega una buena oportunidad en valores para el método a utilizar.

La ecuación de FAO Penman-Monteith propone que existen distintos niveles de cálculo dependiendo de la información que se tiene. Como se explicó en la Sección 2.2.1, los factores que afectan a este proceso se pueden resumir en 3: climáticos, de cultivo y de manejo del cultivo y condiciones ambientales. Para cada uno de estos niveles de información, Penman-Monteith presenta un método de cálculo.

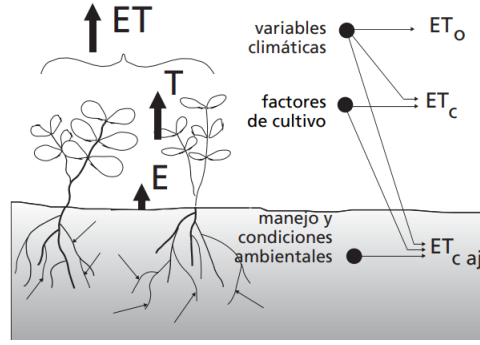


Figura 4.5.1: Distintos niveles posibles de cálculo en el proceso de evapotranspiración con el método de Penman-Monteith [19].

Como se puede apreciar en la Figura 4.5.1, ET_o (evapotranspiración del cultivo de referencia) es el que depende exclusivamente de factores climáticos, ET_c (evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar) depende de los factores climáticos y el tipo de cultivo y $ET_{c,aj}$ (evapotranspiración del cultivo bajo varias condiciones de manejo y ambientales) es el último nivel y este agrega información del manejo del cultivo y condiciones de la zona, a los factores mencionados anteriormente.

En esta investigación se desconoce el tipo de manejo de cultivo (riego, uso de coberturas, entre otros) y características del suelo (salinidad, fertilidad, presencia de plagas, estrés hídrico, entre otros). Por consiguiente, se estudia hasta ET_c .

Para el cálculo de ET_o se considera la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar, esto es pasto distribuido uniformemente por todo el suelo y sin restricciones de agua. Se obtiene con la Ecuación 4.5.1.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) \cdot \frac{3600}{10^6} + \gamma \cdot \left(\frac{37}{T_a + 273}\right) \cdot v \cdot (e^o(T_a) - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot v)} \quad (4.5.1)$$

A continuación se describe cada variable.

- Δ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura ambiente, en $[KPa/^\circ C]$. Ecuación 4.5.2.
- R_n : Radiación neta en la superficie, en $[W/m^2]$. El método de cálculo se presenta en la Sección 4.3.
- G : Densidad del flujo de calor del suelo, en $[W/m^2]$. Debido a las horas simuladas en este estudio, se considera $G = 0,1 \cdot R_n$.
- γ : Constante psicrométrica. Ecuación 4.5.3.
- Para $e^o(T_a)$ y e_a , ambos en $[KPa]$, se utiliza la Ecuación 4.3.6.
- λ : Energía en calor requerida para vaporizar el agua, conocida como calor latente de vaporización, en $[MJ/kg]$. Ecuación 4.5.5.
- C_p : Calor específico a presión constante del aire, en $[MJ/kg^\circ C]$. En el rango de temperaturas del aire utilizadas en este estudio (mínima igual a $4^\circ C$ y máxima igual a

37°C) la variación es de $10^{-6} [MJ/kg^{\circ}C]$, en consecuencia, se considera constante igual a $C_p=1,013 \cdot 10^{-3} [MJ/kg^{\circ}C]$.

- P : Presión atmosférica, en $[KPa]$. Ecuación 4.5.4.
- z_e : Elevación sobre el nivel del mar, en $[m]$. De Google Earth en la zona, se obtiene un promedio de $z_e=175,5 [m]$.
- ξ : Cociente del peso molecular de vapor de agua/ aire seco. $\xi=0,622$.

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^{\circ}(T_a)}{(T_a + 237,3)^2} \quad (4.5.2)$$

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\xi \cdot \lambda} \quad (4.5.3)$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z_e}{293} \right)^{5,26} \quad (4.5.4)$$

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \cdot 10^{-3} \cdot T_a \quad (4.5.5)$$

En la Ecuación 4.5.1, se transforma R_n y G de $[W/m^2]$ a $[MJ/m^2 \cdot hr]$ al multiplicar por $\frac{3600}{10^6}$.

En este método se está asumiendo una resistencia de la superficie igual a $70 [s/m]$, altura de pasto en $0,12 [m]$ y un albedo del suelo en $0,23$. Como ya se tiene información sobre este último, se ocupa el ya comentado en la Sección 4.3.

Como ya se explicó para el modelo de radiación, el valor de albedo debería ir cambiando a medida que el cultivo va creciendo, pero esto solo es posible medir experimentalmente, de ahí que se asuma un valor constante para esta investigación.

ET_o se mide en $[mm/hr]$. Esto es la cantidad de agua que pierde una superficie cultivada en unidades de altura de agua.

En lo que respecta a ET_c , este se define en la Ecuación 4.5.6.

$$ET_c = k_c \cdot ET_o \quad (4.5.6)$$

Donde k_c es el coeficiente único de cultivo, el factor que varía la evapotranspiración según el tipo de cultivo. Es decir, considera valores distintos en la altura del cultivo (esta incide en el valor de resistencia aerodinámica), albedo de la superficie de la planta (la cobertura de la vegetación sobre el suelo afecta el valor de albedo), resistencia del cultivo (la resistencia a transferir el vapor de agua y este parámetro afecta a la resistencia de la superficie) y la evaporación del suelo con este cultivo.

En cuanto a otros factores, considera un campo agrícola lo suficientemente grande en superficie, bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones

climáticas dadas [19].

Así, el valor k_c depende de la etapa de desarrollo del fruto. Esto se obtiene de [19] y se presenta en la Tabla 4.5.1.

Tabla 4.5.1: Factor k_c según etapa para manzanas, cerezas y peras [19].

Características	$k_{c, inicial}$	$k_{c, med}$	$k_{c, final}$
Sin cobertura del suelo, con fuertes heladas	0,45	0,95	0,7
Sin cobertura del suelo, sin heladas	0,6	0,95	0,75
Cobertura activa del suelo, con fuertes heladas	0,5	1,2	0,95
Cobertura activa del suelo, sin heladas	0,8	1,2	0,85

Donde $k_{c, inicial}$ corresponde al factor en la etapa inicial, $k_{c, med}$ en la etapa de mediados de temporada y $k_{c, final}$ en la etapa final.

En el presente trabajo se utiliza los valores asociados a la categoría “cobertura activa del suelo, con fuertes heladas”.

Por otro lado, en la Figura 4.5.2 se presenta el valor del factor para el periodo de evaluación considerado en esta investigación.

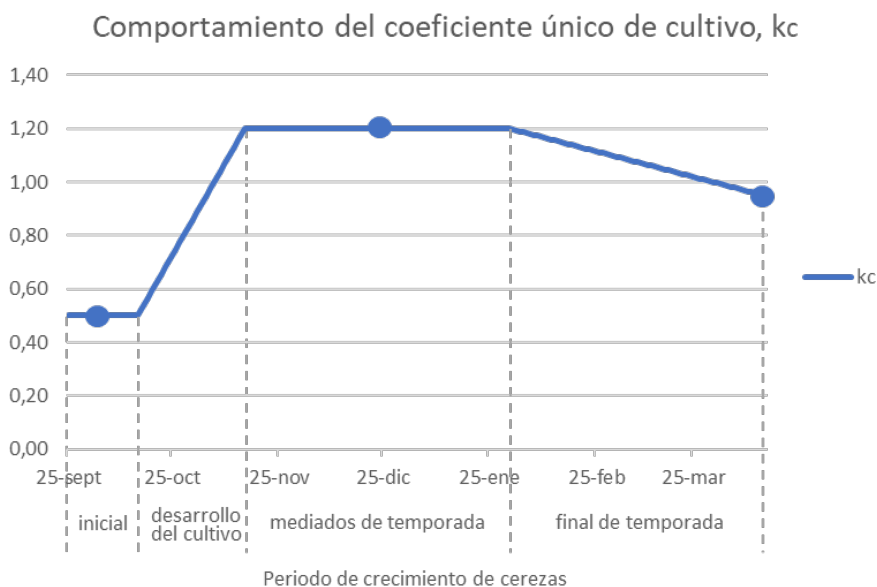


Figura 4.5.2: Valor de k_c para el periodo de crecimiento de una cereza tipo Regina en Chile considerado en este estudio.

En la determinación de este factor no se toma en cuenta el espacio entre los árboles del estudio (este puede variar hasta un 10% con espaciamento estrecho).

Es importante destacar que en la determinación de este factor se considera un clima sub-

húmedo ($HR_{mín,diaria} = 45\%$ y velocidades del viento bajos o moderados con $v_{promedio,diario}=2$ [m/s]). Para este trabajo, la humedad relativa mínima diaria se encuentra entre 10,3% y 65,1%. En cuanto, a la velocidad promedio, esta se encuentra entre 0 y 3 [m/s].

Si bien no se encuentra tan lejano a la situación de referencia, es posible realizar una corrección al coeficiente de cultivo. Lamentablemente, esta depende de información que no se tiene (comportamiento de altura de cerezos según el periodo de crecimiento).

Finalmente, en esta investigación se caracterizarán dos superficies: una con sombra y otra sin. El resultado de ET_c en altura de agua caracteriza cada una de estas, pero no da la oportunidad de tomar un resultado para un cierto tiempo y área. Esto último para poder comparar en suma lo ocurrido en un campo agrícola sin paneles y otro con (proyecto agrivoltaico). Recordando que un sistema agrivoltaico tiene ambas superficies (con y sin sombra).

Es por esto que, el resultado se puede expresar en volumen al tomar en cuenta el área considerada, [$m^3/periodo\ de\ evaluación \cdot área\ considerada$]. Esta se presenta en la Ecuación 4.5.7.

$$ET_{c,volumen\ por\ unidad\ de\ área} = ET_{c,altura\ de\ agua} \cdot A_{considerada} \cdot 0,001 \quad (4.5.7)$$

Para el caso agrícola se considera el área total de terreno, ya que este tiene una superficie que no presenta sombra, por lo tanto existe una única radiación incidente al suelo.

Por el contrario, para el proyecto agrivoltaico se tienen 2 situaciones: una superficie que no presenta sombra (mismo valor en radiación y, por ende, en pérdida de agua que el campo agrícola) y otra superficie que sí está sombreada teniendo una disminución de radiación (aquí se evalúa el área de la sombra) y, por ende, en la pérdida de agua.

Capítulo 5

Comparación de los modelos

Debido a la gran cantidad de ecuaciones utilizadas para cada modelo, es que se realizaron comparaciones con los resultados entregados de programas o base de datos. Estas se presentan a continuación.

5.1. Modelo sombra

Para este modelo se pudo realizar comparaciones en distintas etapas de la construcción de este.

5.1.1. Ángulos del sol

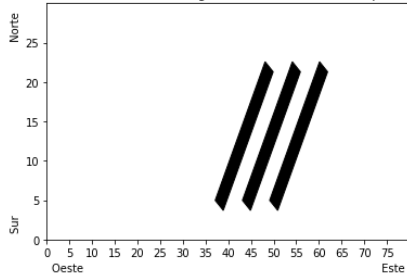
En particular, para el cálculo de ángulos del sol, el cual es la base de este y de todos los modelos, se valida con la calculadora de [62]. Para eso se calcula el porcentaje de error considerando los resultados horarios para un día de cada mes de la evaluación, obteniendo un promedio de 1% para la altitud solar y 1,5% para el azimut solar, con mayores valores en ambos ángulos en las horas extremas.

5.1.2. Metodología

En cuanto a la metodología para obtener la sombra generada, se tiene la ya explicada en la Sección 4.2.1. Pero, otras investigaciones plantean el cálculo sobre cada punto perteneciente al panel, no solo los vértices, lo cual tiene como gran desventaja que es computacionalmente demandante.

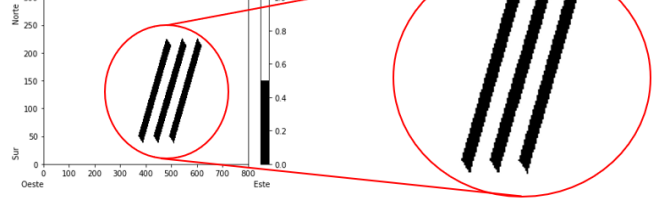
En esta sección se presenta la comparación en resultados de estos dos métodos para un día en la Figura 5.1.1. Se evalúa en solo un día, porque el resultado no cambia por hora, por día ni por mes.

Vista desde arriba de la sombra generada a nivel de suelo por los paneles



(a) Metodología 1.

Vista desde arriba de la sombra generada a nivel de suelo por los paneles



(b) Metodología 2.

Figura 5.1.1: Resultado de dos metodologías (metodología 1: sombra generada por cada vértice de cada fila de paneles y luego se crea un polígono a partir de esos vértices y metodología 2: sombra generada por cada punto perteneciente a las filas de paneles) para un 6 de Noviembre a las 14 hrs para el modo Sun Tracking.

Se denomina metodología 1 a la planteada en esta investigación, esto es, el cálculo solo para los vértices de cada fila de paneles. Por otro lado, se denomina metodología 2 a la que calcula el punto de sombra generada para todos los puntos pertenecientes al panel, considerando un paso de 10 [cm] en el terreno. Este paso fue escogido en función del tiempo que se puede demorar el código de Python en el cálculo.

La denominación de “computacionalmente más demandante”, viene de que esta metodología requiere el uso de una matriz que representa a todo el terreno en sus dimensiones cada 10 [cm], en donde se asigna el valor 0 a los puntos en el suelo donde sí se genera sombra a partir de algún punto del panel y el valor 1 en caso contrario.

De la Figura 5.1.1 se nota cómo la metodología 1 es la mejor opción, ya que los resultados presentan diferencias mínimas en los bordes y el resultado es presentado de manera instantánea. Quedando validado el uso de la metodología 1 en esta investigación.

5.1.3. Sombra conjunta

Otra suposición hecha para los cálculos correspondientes (sobretudo en radiación) es que las sombras de diferentes filas de paneles no se intersectan entre sí. Si bien esto depende de los valores escogidos en los parámetros de diseño (con mayor importancia en la distancia entre filas y la altura de la plataforma), se nota que con diferentes valores en estos la sombra conjunta ocurre en la hora cercana al amanecer, y en menores ocasiones, en la hora cercana al atardecer. A continuación se presenta lo que ocurre para el diseño propuesto.

Antes que todo, hay que indicar que esta situación ocurre solo para el modo Sun Tracking. En la Figura 5.1.2 se presenta el resultado para un 28 de Septiembre a las 8 hrs para los modos Sun Tracking y Control Tracking y se presentan las sombras generadas por cada fila, en diferentes colores distintos de negro para que se resalte su intersección.

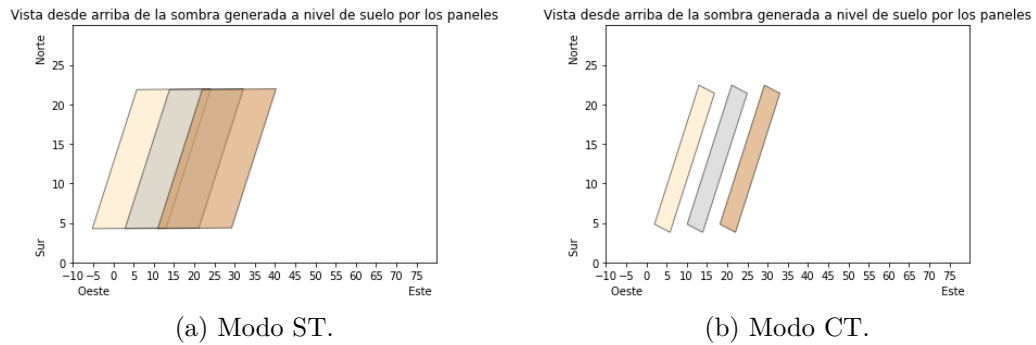


Figura 5.1.2: Resultado para los modos Sun Tracking y Control Tracking, para un 28 de Septiembre a las 8 hrs.

Se recuerda que el modo de equilibrio CT/ST se comporta al igual que Control Tracking en las mañanas, por eso no se presenta su comportamiento.

De la Figura 5.1.2.a podría ser difícil identificar las intersecciones que se producen, por eso se presenta la Figura 5.1.3, en donde el rectángulo en rojo delinea la suma de toda la sombra conjunta.



Figura 5.1.3: Sombra conjunta para el modo Sun Tracking para un 28 de Septiembre a las 8 hrs.

Se nota una importante intersección entre las tres filas de paneles para Sun Tracking. Esta es una de las mayores que ocurre en todo el periodo de evaluación, pero en la Figura 5.1.4 se muestra cómo va cambiando el comportamiento para todo este periodo en las horas cercanas al amanecer.

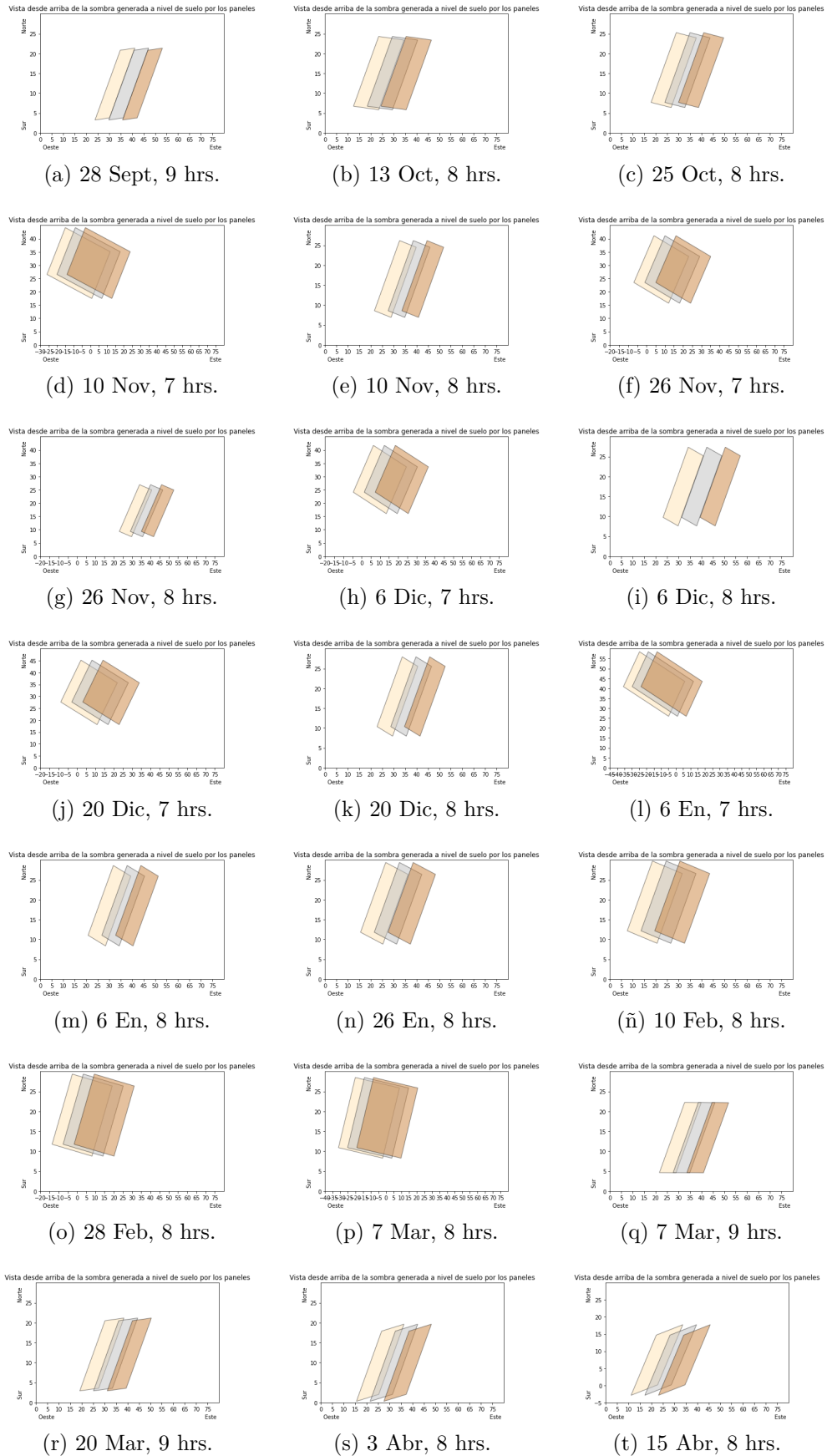


Figura 5.1.4: Sombra generada a nivel de suelo en las horas cercanas al amanecer donde se produce intersección de esta para todo el periodo de evaluación, en modo Sun Tracking. 51

Como se dijo, esto también ocurre para la hora cercana al atardecer, pero en menor magnitud y cantidad de días.

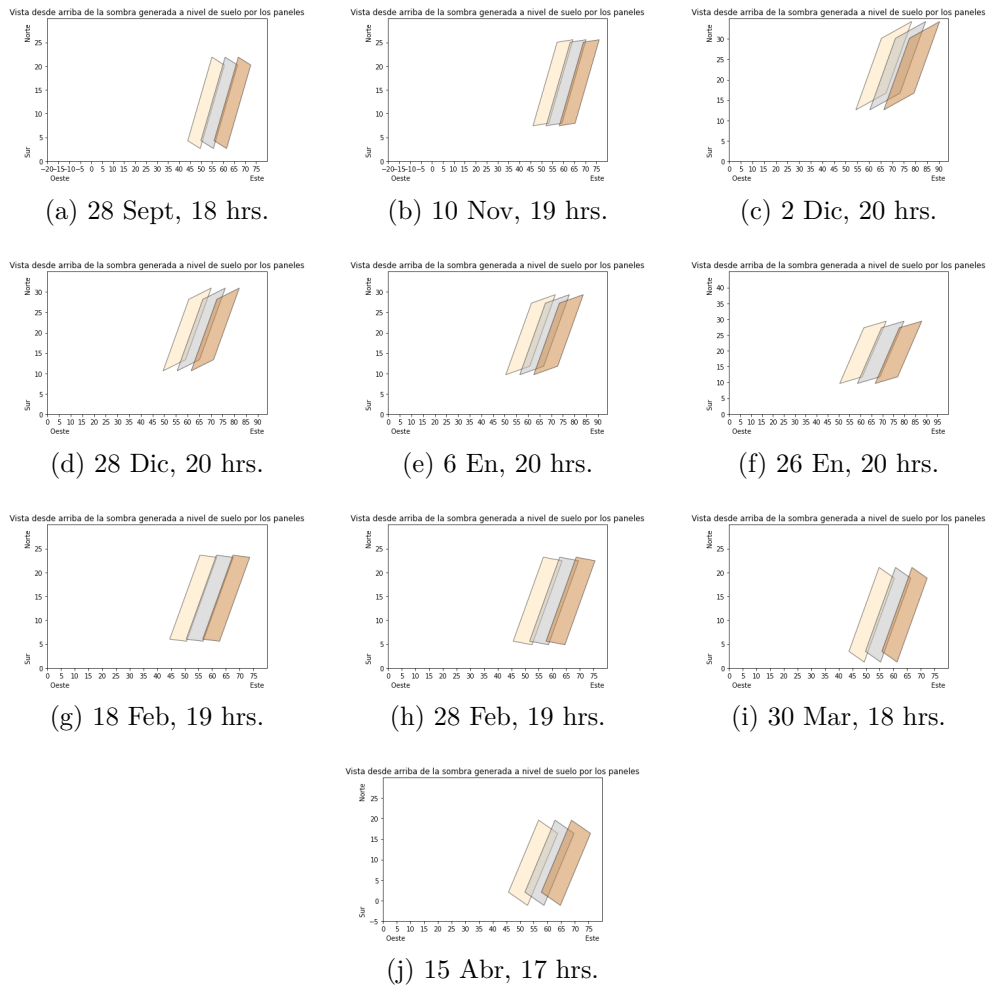


Figura 5.1.5: Sombra generada a nivel de suelo en las horas cercanas al atardecer donde se produce intersección de esta para todo el periodo de evaluación, en modo Sun Tracking.

Esto se debe considerar en el cálculo de los modelos y será discutido más adelante.

5.1.4. Áreas sombras

Una de las validaciones más importantes es sobre el área y la posición de las sombras generadas por los paneles.

Se utiliza el programa Revit, con el cual se comparan las coordenadas de los vértices de la sombra que genera una fila de 4 paneles, rotada en 32° NE y con altura de 3 metros (ver Figura 5.1.6), para un día en específico.

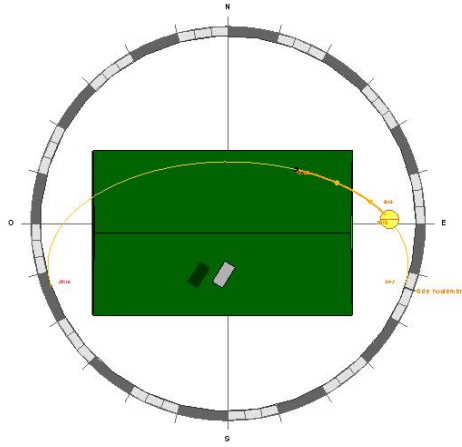


Figura 5.1.6: Sombra generada por un obstáculo, que representa una fila de 4 paneles, en Revit.

En la Figura 5.1.7 se muestra la diferencia encontrada en los resultados del modelo de esta investigación y el programa Revit.

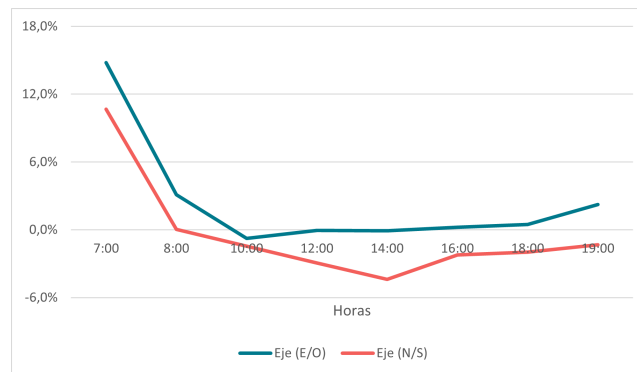


Figura 5.1.7: Diferencia entre las coordenadas obtenidas por Revit y el modelo presentado en este estudio, para todas las horas de un 6 de Noviembre.

En la hora de amanecer es en donde se tiene un valor que resalta, pero salvo este la diferencia no sobrepasa el 3%. En las horas de la mañana se sobrestima el área y luego se subestima levemente, obteniéndose un promedio de 1% de diferencia con el programa Revit. Esto implica una muy buena validación del modelo utilizado en esta investigación.

Por otro lado, como se dijo, aquí se está suponiendo que el espesor es despreciable en su efecto causado en la sombra. Al comparar los resultados obtenidos del modelo de esta investigación considerando a un panel sin espesor con respecto a lo arrojado por el programa Revit al considerar el panel real, es decir, con 35 [mm] de espesor; se obtuvo la diferencia que se muestra en la Figura 5.1.8.

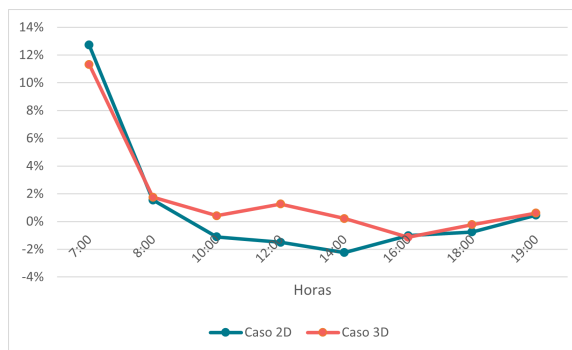


Figura 5.1.8: Diferencia entre las coordenadas obtenidas por Revit para un panel con espesor (caso 3D) y el modelo presentado en este estudio para un panel sin espesor (caso 2D), para todas las horas de un 6 de Noviembre.

Al examinar los resultados se nota una disminución en la diferencia en la hora de amanecer y en general para las demás horas se presenta un leve aumento del error, generándose un promedio de 0,8 % de diferencia entre ambos métodos.

Aunque el promedio aumenta, este sigue siendo un valor que podría considerarse casi despreciable validando así la suposición del efecto mínimo en el espesor del panel fotovoltaico.

5.2. Modelo radiación

Primero que todo, en esta investigación se ha dicho que el mayor impacto lo tiene la radiación. Para mostrar gráficamente esto, se buscó un proyecto con parámetros de diseño similares para observar la variación del microclima bajo el panel. De esta forma se encontró al realizado por Fraunhofer Chile Research cerca de Curacaví [63], también perteneciente a la zona central como la localidad de este estudio. La distancia entre paneles fue de aproximadamente 5 metros, la altura de 3,9 metros y el ancho de panel de 1,7 metros aproximadamente.

Estos parámetros son afines a esta investigación, del cual se podría considerar más lejano al ancho (2,1 [m] se considera en este estudio).

En la Figura 5.2.1 se muestra como la variación sobre este proyecto agrivoltaico es despreciable para los factores climáticos más importantes del microclima después de la radiación. Sin embargo, se debe considerar que la emisividad del suelo, del aire y el albedo también pueden variar; pero este tipo de parámetros no son muy estudiados en estos proyectos.

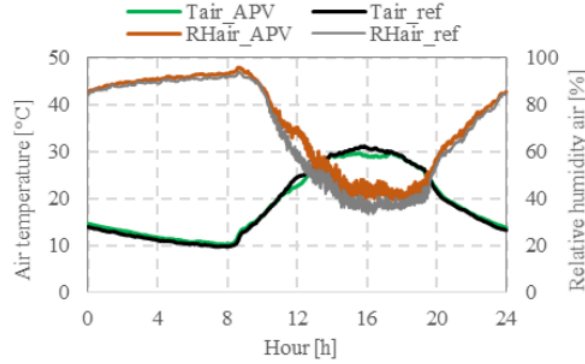


Figura 5.2.1: Variación de humedad relativa y temperatura del aire en proyecto agrivoltaico cercano a Curacaví realizado por Fraunhofer Chile Research [63].

En cuanto al modelo propuesto aquí, se puede decir que para el modelo de radiación, en el caso de campo agrícola (sin sombra), ya se discutió una investigación que lo aborda y se ocupó valores experimentales propuestos en ella por su cercanía con la localidad investigada en este documento y su bajo porcentaje de error.

Por otro lado, para el modelo desarrollado en radiación incidente a un suelo sombreado no se encontró otra investigación como esta, donde se haga un balance radiativo que considere la radiación de onda corta y larga. Por consiguiente, este modelo no se puede comparar.

Lo más cercano fue la simulación con el programa Revit, el cual calcula la radiación incidente que llega al suelo. Como se muestra en la Figura 5.1.6, este programa permite agregar obstáculos en altura y calcular la que llega en esta situación.

El problema es que solo considera la radiación de onda corta, no la transferencia radiativa con el aire o del mismo panel (el programa no lo reconoce como un panel fotovoltaico). La ecuación base se muestra en 5.2.1 [64].

$$R_n = I_b \cdot F_s \cdot \cos(\theta) + I_d \cdot F_c + I_r \quad (5.2.1)$$

Con F_s el factor de sombra (igual a 1 si un punto no está sombreado y 0 si un punto está sombreado), F_c el factor de cielo visible e I_r como la radiación reflejada del suelo.

Se encontró un 18% de diferencia entre lo arrojado por Revit y el modelo desarrollado para el caso agrícola. Esto es la diferencia en valores horarios de radiación global para la localidad estudiada, esto se debe solamente a las diferentes fuentes de obtención de las variables climáticas. Esta comparación se realiza solo para un día cualquiera, en este caso, 1 de Noviembre.

Para la zona sombreada se compara con el resultado promedio que arroja Revit en la zona de sombra. Como se puede ver en la Figura 5.2.2.a, existe una distribución de radiación en la zona sombreada.

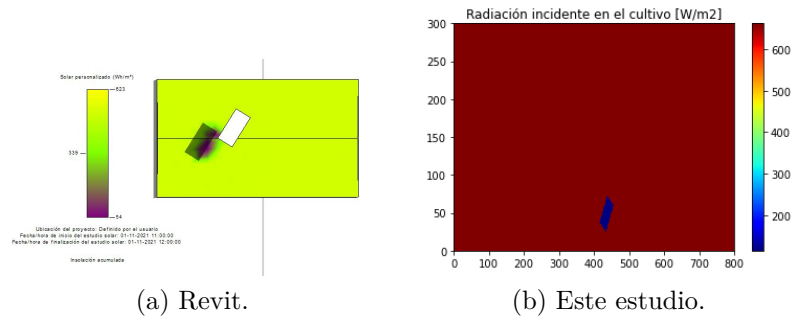


Figura 5.2.2: Resultado en la radiación para un 6 de Noviembre con una fila de 4 paneles a 3 metros de altura, con Revit y el modelo presentado en esta investigación. En (a) se muestra tanto la fila en altura como su sombra y la respectiva distribución de radiación, en (b) solo se muestra la radiación incidente al suelo sombreado (único valor en todo el espacio).

De esta manera, se obtiene un 17% de diferencia entre el modelo y el promedio de la radiación arrojada en la zona con sombra.

5.3. Modelo evapotranspiración

Finalmente, de la misma estación de donde se obtuvieron los datos climáticos (tema que será discutido más adelante) se pudo obtener la evapotranspiración de referencia (ET_o) para la localidad, la que solo depende de factores climáticos.

Para obtener este resultado, la estación ocupa el mismo modelo [39] utilizado y presentado en este estudio.

En la Figura 5.3.1 se puede observar la diferencia encontrada entre estos valores y los calculados con el modelo presentado en este trabajo.

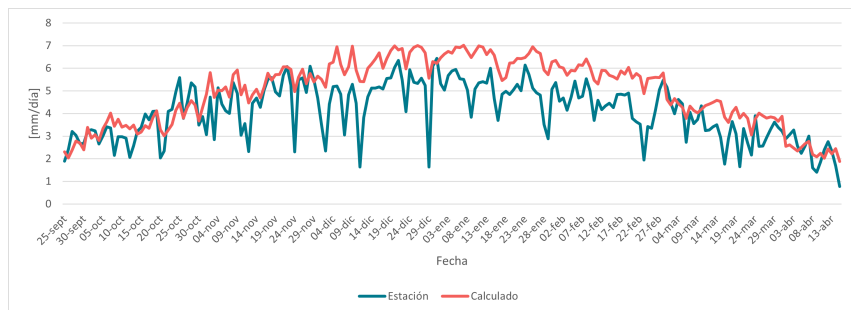


Figura 5.3.1: Diferencia diaria de ET_o en [mm/día] entre lo entregado en la estación de San Clemente y el resultado del modelo de esta investigación.

Si bien con el método de este trabajo, se sigue la tendencia de los datos de la estación a lo largo del periodo de evaluación, estos llegan a valores altos de diferencia en los días que escapan esta tendencia general.

Como se comentará en más detalle en el próximo capítulo, los resultados del modelo están basado en datos de radiaciones de un día representativo del mes (factor principal en variación

del proceso de evapotranspiración). Es decir, no se considera variaciones diarias de un mes, lo que explicaría este comportamiento.

La variación promedio es de un 29 %, esto estaría indicando la importancia de considerar la variabilidad diaria de un mes.

Capítulo 6

Resultados y discusiones generales

En los capítulos que continúan, se presentan los resultados obtenidos de los modelos ya descritos con su respectivo análisis.

En el presente capítulo se discute las consideraciones ocupadas y los resultados generales, esto es, los resultados que engloban a la situación tanto para un suelo sin sombra como para uno con sombra. Luego, se presentará los resultados obtenidos para un campo agrícola sin paneles y otro con (proyecto agrivoltaico). Finalmente, se analiza el impacto que causa la variación de diferentes parámetros de diseño del sistema fotovoltaico sobre los modelos.

Es importante destacar que se escoge evaluar los cálculos cada una hora, debido a la limitación encontrada en los datos climáticos. Esto es el menor paso de tiempo encontrado en los datos del Explorador Solar.

6.1. Parámetros de entrada y principales consideraciones

6.1.1. Periodo de evaluación

Como ya se justificó, se realizaron todos los cálculos para el periodo entre el 25 de Septiembre del año 2021 hasta el 15 de Abril del año 2022, considerando las horas de la Tabla 3.2.1. Pero se decide tomar las horas de la Tabla 6.1.1, por comportamiento extraño en variables en ciertas horas.

Tabla 6.1.1: Horas a estudiar para todo el periodo de evaluación.

Mes	Inicio	Fin
Septiembre	8:00	18:00
Octubre	8:00	18:00
Noviembre	7:00	19:00
Diciembre	7:00	20:00
Enero (1/01 - 10/01)	7:00	20:00
Enero (11/01 - 31/01)	8:00	20:00
Febrero	8:00	19:00
Marzo (1/03 - 14/03)	8:00	18:00
Marzo (15/03 - 31/03)	9:00	18:00
Abril (1/04-2/04)	9:00	18:00
Abril (3/04-15/04)	8:00	17:00

En el caso de enero, esto ocurre porque en el segundo rango mostrado de este mes (11/01-31/01), la hora del amanecer se encontraba muy cercana a las 7, ocasionando que los resultados en radiaciones (I_{GI} , I_{bi} y I_{di}) y temperaturas alcanzadas en el panel (T_p y T_{cel}), mostraran un comportamiento distinto al esperado (valores extremadamente altos en radiaciones y temperaturas negativas o muy altas). Por eso, se decidió sacar de la evaluación de resultados a estas horas. En el caso de marzo ocurre lo mismo.

Para abril, la razón es otra. El día 2 de abril en Chile se cambia al horario de invierno, implicando el retraso de la hora al llegar a las 24 hrs. Por eso, el día 3 de abril las horas para el inicio, mediodía solar y fin, cambian con respecto a los primeros días del mes en una hora.

6.1.2. Dimensión terreno

Para la determinación de la dimensión del terreno a utilizar como ensayo, se verifica de forma visual dimensiones que logren abarcar las sombras generadas por las filas de paneles en las distintas horas, días, meses y modos de configuración.

Las horas en los extremos (amanecer y atardecer) son las que presentan sombras más lejanas a la zona donde se encuentran los paneles a causa de la posición del sol.

De esta manera, se obtiene una dimensión de 80 x 30 [m] ($A_{total}=2.400 [m^2]$), como se muestra en la Figura 6.1.1.

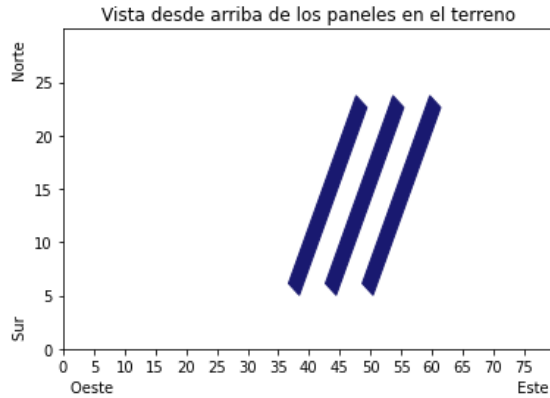


Figura 6.1.1: Dimensiones de la superficie a evaluar, ejemplificado en una vista superior de los paneles en el terreno para un 6 de Octubre a las 12 hrs en modo Sun Tracking.

6.1.3. Punto de origen

Se considera como punto de origen a la coordenada descrita por $x_o=42$, $y_o=4$ y $z_o=H$.

Este punto fue escogido, al igual que la dimensión del terreno, en función de encontrar una coordenada que pudiera generar la sombra dentro de las dimensiones sin considerar una dimensión demasiado grande. La elección de este punto y dimensión fue hecha a la par.

6.1.4. Modelo de radiación

Para el modelo de radiación se nota un comportamiento extraño en las radiaciones netas incidentes al suelo (R_n). Esto es, radiaciones negativas, lo cual se explica por la baja radiación alcanzada en determinadas horas tal que el suelo no absorbe radiación sino que la emite.

Esto se presenta en algunos días en horas a los extremos (amanecer y atardecer) y en horas cercanas a ellas.

Para el modo Sun Tracking, estos casos representan un 20,4% de todas las horas consideradas, para el modo CT/ST un 21,96% y para Control Tracking un 27,8%. Estos resultados son con respecto a el diseño propuesto presentado en la Sección 3.3.

En consecuencia, se decide dejar fuera del ensayo a estos comportamientos al considerar solo valores positivos (radiaciones entrantes al suelo).

De esta forma, también se resuelve para la mayoría de los casos el problema con la sombra conjunta. Quedan consideradas algunas horas con sombras conjuntas a las 9 hrs, las cuales representan un 2,7% sobre todas los casos considerados. Debido al bajo porcentaje de representación frente a todos los casos, lo complejo que podría ser abordar este problema y que esto ocurre solo en modo Sun Tracking; es que no se realiza algún cálculo para considerar estas intersecciones.

6.1.4.1. Uso del factor de visión

Hay que explicar el uso del factor de visión, ya que la librería de Python entrega no solo el factor de visión al suelo en el espacio sombreado, sino que en los alrededores también. En la Figura 6.1.2 se presenta el resultado entregado para una hora cualquiera de un día en modo Sun Tracking.

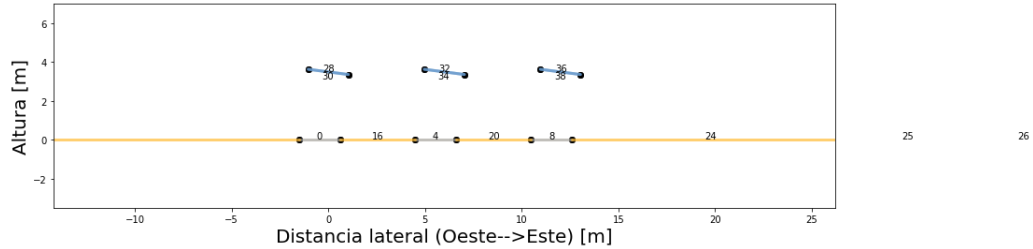


Figura 6.1.2: Zonas en donde es posible obtener un valor del factor de visión a partir de las superficies de los paneles.

Los bloques azules representan a cada fila de paneles, los bloques grises representan la sombra que generan y las líneas amarillas el suelo. Cada bloque o línea en el suelo con un número asignado indica que es posible calcular el factor de visión entre estas zonas y cualquier superficie trasera de los paneles asignada con un número.

Es un buen método para calcular el factor de visión, pero tiene desventajas. Primero, como ya se podrá haber dado cuenta el lector, no pareciera ser un método tan automático, ya que hay dos números asignados a sectores fuera del rango de evaluación (que aparecen fuera del rectángulo de la imagen). Segundo, como la ubicación de la sombra va variando según la hora, en la mayoría de los casos estos números asignados también varían, lo que afecta al cálculo automático para todo el periodo de evaluación de esta investigación. Tercero, relacionado a lo anterior, los números asignados varían de un modo a otro.

Todo lo anteriormente dicho, complica el cálculo automático para el considerable periodo de evaluación y para todos los modos. En vista de esta situación, se decide realizar el cálculo del factor de visión solo de la parte trasera de una fila de paneles hacia el suelo sombreado.

Si bien, de todas formas se tuvo que analizar el comportamiento para los distintos modos y según la fecha evaluada; al considerar el cálculo sobre solo una fila de paneles (que represente a lo que ocurre en todas) se simplifica el cálculo, como se puede observar en la Figura 6.1.3.

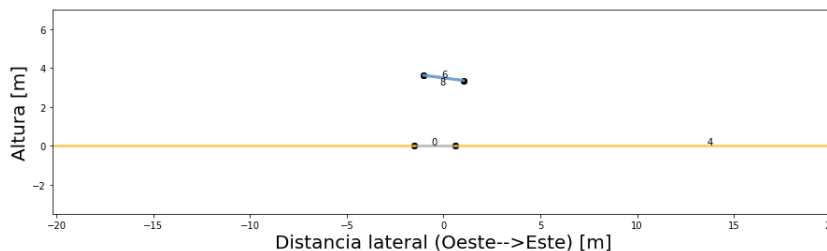


Figura 6.1.3: Representación para el cálculo del factor de visión entre la parte trasera de los paneles de solo una fila y la sombra que esta genera.

Es importante destacar que el valor agregado por parte de la radiación de onda larga, que considera al factor de visión en las zonas no evaluadas en esta investigación (zonas aledañas a la sombra), no impacta de forma cuantiosa. Esta radiación, sin considerar la disminución a causa del factor de visión (este valor va de 0 a 1), con respecto a la radiación global horizontal que llega a la zona entre sombras de las filas de los paneles, representa un 11,3 % para Sun Tracking, 10,7 % para CTST y 1 % para Control Tracking. Valores bastantes pequeños.

Si se sigue en esta línea, en estas zonas entre sombras, el mayor valor encontrado de factor de visión es para Sun Tracking y es de un 0,38, es decir, el mayor impacto es de un 4 % con respecto al valor ya considerado. Quedado así validada la decisión de no entrar en este estudio.

Es importante destacar que si bien 0,38 es un valor alto e incluso mayor que los factores de visión que se encontrarán aquí (caso de un panel hacia el suelo sombreado), también se debe considerar un aumento en este último cálculo. Esto es por el efecto de todas las filas de paneles sobre la zona sombreada por cada una de estas. El valor considerado en este estudio se cuenta como 0,28 (peor de los casos, es decir, mayor valor) y al considerar lo anterior puede aumentar hasta un 0,39. Esto implica que en este documento se consideraría el 72 % del valor real, para el peor de los casos.

Debido al bajo aporte de radiación de onda larga hacia las zonas entre sombras y al alto porcentaje considerado en factor de visión hacia la sombra, es que se puede decir que en la práctica los resultados obtenidos en esta investigación no deberían tener una tendencia distinta ni estar lejanos en valor.

6.1.5. Datos Climáticos

Con respecto a los factores climáticos de la localidad necesarios, se obtienen de dos fuentes: Explorador Solar [27] y la estación de San Clemente de la Red Agrometeorológica de INIA [39].

Del primero solo fue posible obtener los datos para un día representativo del mes según hora, lo que obliga a suponer que cada día del mes presenta el mismo comportamiento para ciertas variables. Es de conocimiento que esto no ocurre en la práctica. Por consiguiente, desde aquí ya se debe tener en cuenta la existencia de un margen de diferencia con los resultados reales en la zona.

En cambio, con la estación de INIA se puede acceder a datos con paso de tiempo de hasta 30 minutos y con la variación respectiva para cada día del mes.

Como consecuencia, se evalúan todos los modelos según un paso de tiempo de una hora y con comportamientos invariables según el día del mes en radiaciones y el factor de nubosidad. En la Tabla 6.1.2 se presentan las variables con su fuente respectiva.

Tabla 6.1.2: Fuente de obtención de los datos climáticos para la ubicación del proyecto.

Variable	Fuente
T_a	Estación San Clemente, INIA
T_s	Estación San Clemente, INIA
HR	Estación San Clemente, INIA
v	Estación San Clemente, INIA
Radiación (I_{GH} , I_b y I_d)	Explorador Solar
f_N	Explorador Solar

Estos datos se obtuvieron para los tiempos mostrados en la Tabla 6.1.1, siguiendo la lógica de considerar desde el año 2021 hasta el 2022.

f_N alude a un factor que apunta a la nubosidad de la zona, por lo que, $f_H=1-f_N$ (variable utilizada aquí).

6.2. Ángulo de incidencia

Otro aspecto importante es analizar el desempeño de los modelos desarrollados para cada modo de configuración, en función del objetivo que busca cada uno de estos. Se recuerda que estos se caracterizan por un ángulo de elevación y ángulo de incidencia.

Como se explica en la Sección 4.1.1, la gran diferencia entre el modo Sun Tracking y Control Tracking, es que el primero busca minimizar el ángulo de incidencia y el último maximizarla (que sea cercano a 90° en el ángulo de incidencia). Por ende, se debería cumplir que el ángulo de incidencia de Sun Tracking siempre sea menor que Control Tracking, como se muestra en la Tabla 6.2.1.

Tabla 6.2.1: Ángulo de incidencia en las horas evaluadas para un 26 de Septiembre en modo Sun Tracking (ST), equilibrio CT/ST y Control Tracking (CT).

Hora	Ángulo de incidencia (θ) [°]			$\theta_{ST} < \theta_{CT}$?
	ST	CT/ST	CT	
8:00	37,0	80,3	80,3	Sí
9:00	22,3	60,5	60,5	Sí
10:00	16,4	47,5	47,5	Sí
11:00	24,9	46,7	46,7	Sí
12:00	36,1	36,1	56,6	Sí
13:00	44,5	44,5	70,1	Sí
14:00	49,4	49,4	81,2	Sí
15:00	51,1	51,1	87,6	Sí
16:00	50,4	50,4	89,8	Sí
17:00	47,5	47,5	89,8	Sí
18:00	42,4	42,4	89,1	Sí

Esta tendencia esperada no sucede para todas las horas de las fechas consideradas y se encuentra que estas situaciones representan un 1 % frente al rango total. Esto ocurre siempre a las 10 hrs desde el 8 de Diciembre hasta el 12 de Enero.

En la Tabla 6.2.2 se presentan algunos de estos casos para mostrar la diferencia de grados entre los modos.

Tabla 6.2.2: Alguno de los casos en donde no se cumple la tendencia esperada en el ángulo de incidencia entre los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).

Día	Mes	Hora	Ángulo de incidencia (θ) [°]		Diferencia [°]
			ST	CT	
8	Diciembre	10:00	23,8	23,5	0,3
12	Diciembre	10:00	24,3	23,2	1,1
16	Diciembre	10:00	24,8	23,0	1,8
20	Diciembre	10:00	25,3	23,0	2,3
24	Diciembre	10:00	25,6	23,1	2,5
28	Diciembre	10:00	25,9	23,4	2,5
2	Enero	10:00	26,0	24,0	2,0
6	Enero	10:00	26,1	24,6	1,4
10	Enero	10:00	26,0	25,4	0,6
12	Enero	10:00	26,0	25,9	0,1

Lo anterior se explica con que a esa hora los ángulos de incidencia, entre ambos modos, son muy cercanos llegando a ser levemente menor en Control Tracking.

Esto indica que se podría mejorar el modelo orientado al cálculo del ángulo de elevación en ambos modos. Sin embargo, un 1% de error parece ser un resultado bastante aceptable.

6.3. Potencia generada

Lo comentado anteriormente, afecta directamente al cálculo de potencia generada. En estos mismos tiempos y otros (cercano en horas) donde el modo Sun Tracking logra ser menor, pero muy levemente, la potencia generada del modo Sun Tracking no es mayor que en Control tracking.

Esto ocurre a un 2% de todas las horas evaluadas y en la Tabla 6.3.1 se muestra la diferencia entre ambos modos para las mismas fechas abordadas en el ángulo de incidencia.

Tabla 6.3.1: Alguno de los casos en donde no se cumple la tendencia esperada en la potencia generada entre los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).

Día	Mes	Hora	Potencia generada [W]		Diferencia [W]
			ST	CT	
8	Diciembre	10:00	506,9	508,2	1,3
12	Diciembre	10:00	499,3	504,2	5,0
16	Diciembre	10:00	525,5	534,0	8,5
20	Diciembre	10:00	520,8	531,2	10,4
24	Diciembre	10:00	513,9	525,2	11,4
28	Diciembre	10:00	531	543	12,0
2	Enero	10:00	527,4	537,2	9,8
6	Enero	10:00	538,2	545,6	7,4
10	Enero	10:00	544,7	548,2	3,5
12	Enero	10:00	555,9	557,0	1,1

No está demás destacar, que los resultados de la Tabla 6.3.1 son evaluados con el funcionamiento de solo un panel. Independiente de cuántos paneles se considere, este comportamiento afecta.

6.4. Otros

En la presente investigación se tienen varios resultados interesantes de analizar, pero debido al objetivo definido, es que no se presentaron ni se discutieron. En el Anexo B se presentan los más importantes.

Capítulo 7

Resultado y análisis para campo agrícola

En este capítulo se presenta y comenta los resultados obtenidos para el campo agrícola (sin paneles) ya existente, situación base a comparar con el proyecto agrivoltaico. En ambos casos se utiliza la dimensión del terreno ya nombrada.

Se comienza con los resultados en radiación sobre el suelo y luego el proceso de evapotranspiración.

7.1. Radiación

En la Figura 7.1.1 se muestra el comportamiento de la radiación incidente a un suelo no sombreado (R_n) y el aporte que tiene la radiación de onda corta (R_{oc}) y de onda larga (R_{ol}).

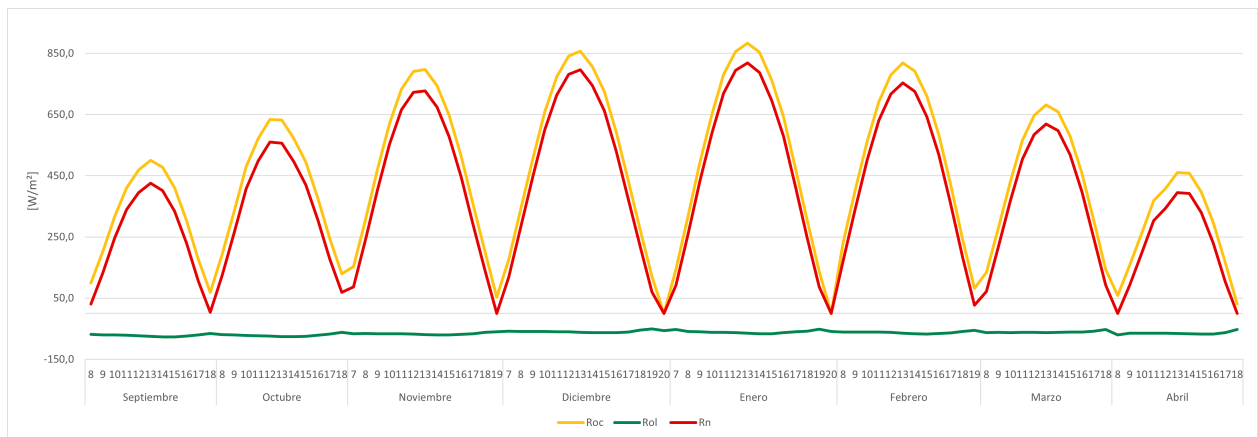


Figura 7.1.1: Radiación de onda corta, larga y neta para un suelo sin sombra (campo agrícola) en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.

R_{oc} es una curva con máximo en el mediodía solar de cada mes con clara dependencia en las horas del día. Asimismo, esta alcanza valores mayores en los meses de noviembre a febrero.

De otros estudios vistos, como [51], lo usual es que R_{ol} tome valores negativos, es decir, que

la transferencia radiativa sea hacia el aire, no entrante al suelo. Este es el factor que provoca que en las horas cercanas a los extremos (amanecer y atardecer) se alcance una radiación neta negativa, provocando una eliminación de estas horas para el estudio.

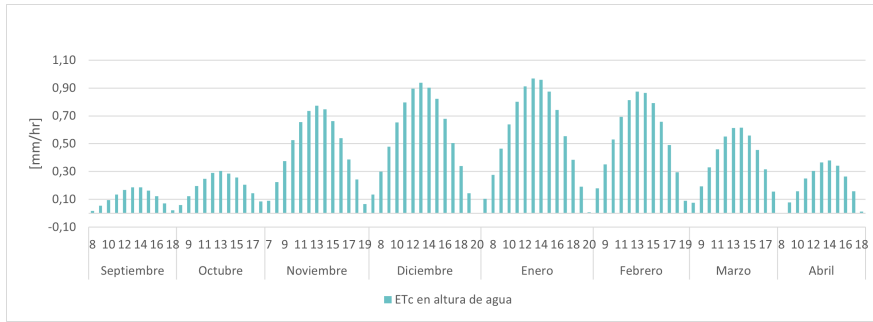
Analizando con mayor énfasis sobre este factor, se logra notar que el valor de la emisividad atmosférica (ε_{at}) es la que define qué tan negativo es el resultado, ya que de la Figura 3.2.1.b se aprecia la cercanía entre las temperaturas del aire y suelo, dejando a la diferencia entre la emisividad del suelo, y la nombrada, tener mayor influencia. Se recuerda que la emisividad del suelo no tiene un amplio rango en el valor tomado, como la atmosférica.

De esta forma, este es un valor que tiene una gran incidencia en el resultado y se reafirma la importancia de escoger el modelo más adecuado en función de los factores que inciden en la investigación.

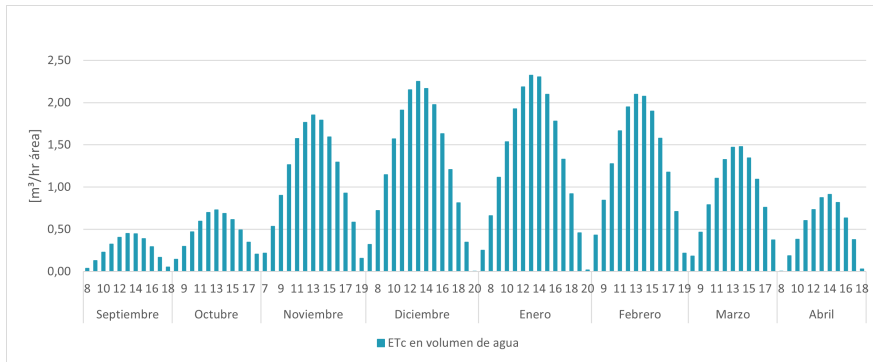
Finalmente, el comportamiento que describe la radiación neta al suelo queda determinado principalmente por la radiación de onda corta, y la radiación de onda larga cumple con el rol de desplazar este comportamiento hacia el sentido negativo, incidiendo en promedio en un 15 % al resultado final.

7.2. Evapotranspiración

En cuanto a la pérdida de agua obtenida en un campo agrícola debido al proceso de evapotranspiración, se tiene los resultados reflejados en la Figura 7.2.1.



(a) En altura de agua (en suelo sin sombra).



(b) En volumen de agua.

Figura 7.2.1: Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar, ET_c , en distintas unidades de medida para el campo agrícola en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.

La Figura 7.2.1 muestra la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar, ET_c , en dos unidades de medida, altura y volumen de agua.

Se puede notar la clara influencia predominante de la radiación incidente al suelo en el resultado. Provocando una mayor pérdida de agua por parte de los cerezos en los meses con mayor radiación solar (noviembre a febrero). Esta tendencia es más potente que la apreciada en radiación (Figura 7.1.1).

Entre los valores mínimos y máximos en la radiación existe una diferencia promedio del 53,4 %. En cambio, para los resultados en evapotranspiración existe una diferencia del 81 %.

Este comportamiento no se debe a efectos de alguna variable climática, sino a las necesidades específicas del cerezo, lo cual viene dado por medio del factor k_c (ver Figura 4.5.2).

En resumen, en escala macro, se observa que el comportamiento de ET_c está definido principalmente por la radiación incidente al suelo y el factor único del cerezo, k_c .

En la Tabla 7.2.1 se muestra el valor total de pérdida de agua por los cerezos en el terreno de ensayo para todo el periodo que se evalúa en esta investigación.

Tabla 7.2.1: ET_c en altura y volumen de agua en todo el periodo de evaluación, para el campo agrícola.

	Campo agrícola
ET_c [mm /periodo de evaluación]	1.085
ET_c [m^3 /periodo de evaluación \cdot área total terreno]	2.604

Capítulo 8

Resultado y análisis para proyecto agrivoltaico con diseño propuesto

En el presente capítulo se evalúa los resultados en los distintos modelos para el proyecto agrivoltaico (ahora considerando el impacto de los paneles sobre el suelo y cultivo) con el diseño de referencia propuesto en la Sección 3.3. En la Tabla 8.0.1 se resumen los datos de entrada de este.

Tabla 8.0.1: Datos de entrada del diseño de referencia para el proyecto agrivoltaico.

Parámetros de entrada	Valor
$n_{paneles}$	20
n_{filas}	3
Altura, H [m]	3,5
Distancia, D [m]	6
Largo terreno [m]	80
Ancho terreno [m]	30
Ángulo de rotación del campo [°]	-32

Se recuerda que este diseño tiene el objetivo del modo de equilibrio CT/ST.

Como ya se ha explicado, en las zonas no sombreadas se tendrán los mismos resultados que fueron mostrados para el campo agrícola. Esta será la situación base a comparar.

8.1. Sombra

El primer modelo a analizar es el de la sombra. Visualmente se puede ver el comportamiento en la Figura 8.1.1.

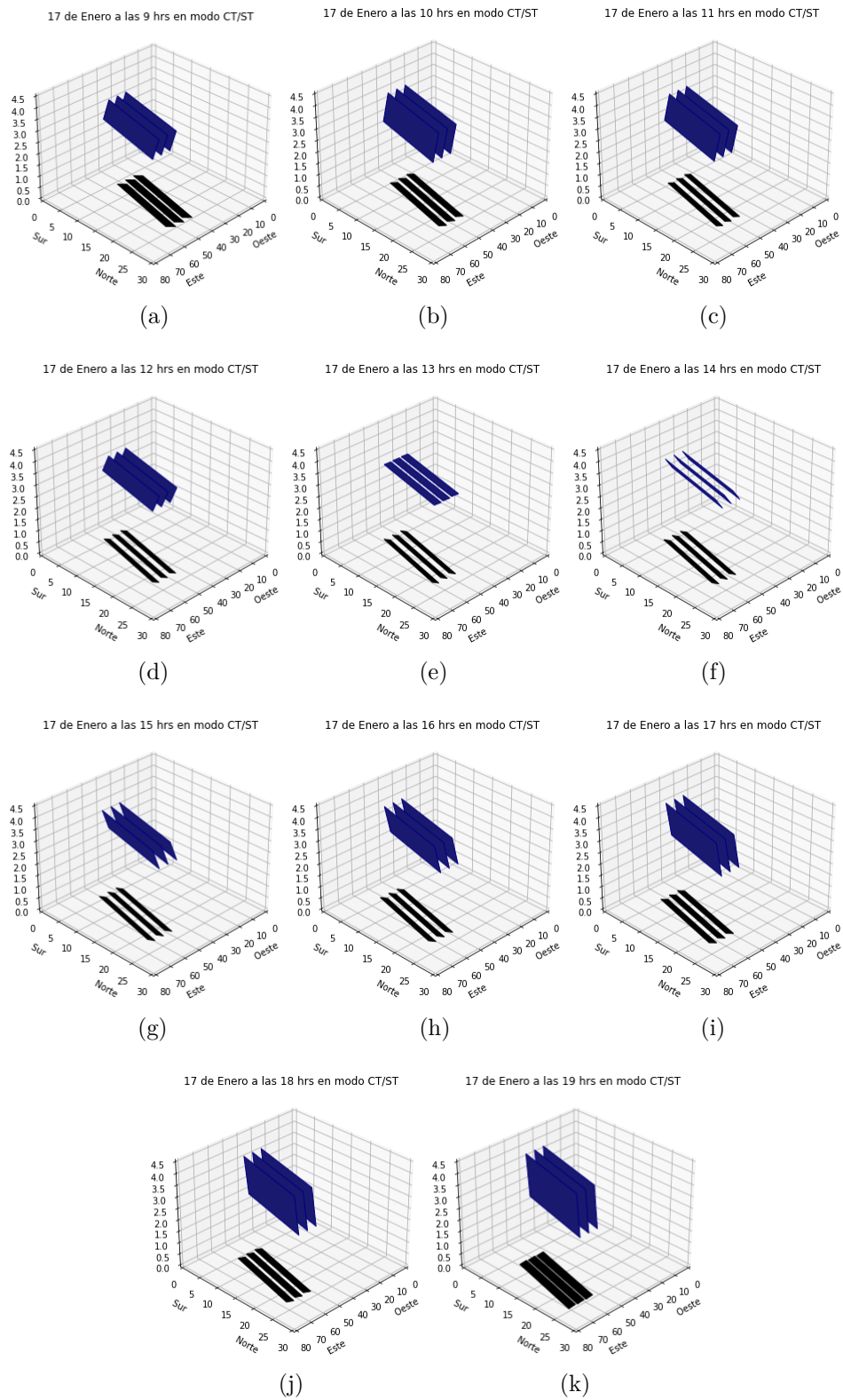


Figura 8.1.1: Sombra generada por los paneles para el diseño de referencia (modo de equilibrio CT/ST) en un 17 de Enero.

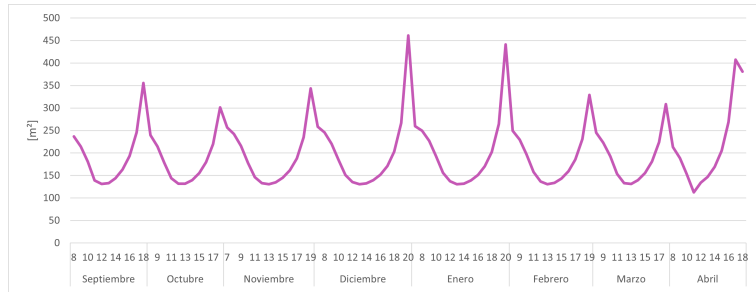
Los bloques azules representan a las filas de paneles y los rectángulos negros a la sombra generada por cada una de ellas.

En la Tabla 8.1.1 se puede acceder a los ángulos de todos los paneles, ilustrado en las imágenes anteriores.

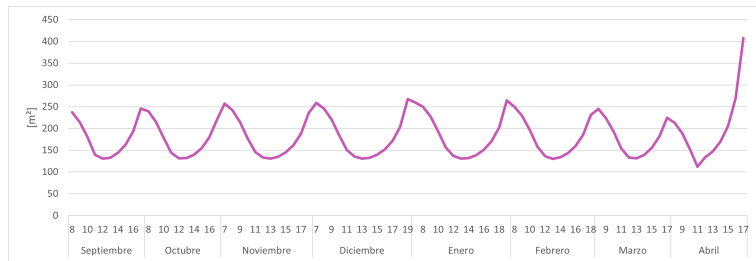
Tabla 8.1.1: Ángulo de elevación e incidencia para el 17 de Enero para el proyecto agrivoltaico con modo de equilibrio CT/ST.

Fecha	Hora	β [°]	θ [°]
17-01-2022	9:00:00	24,6	43,3
17-01-2022	10:00:00	36,8	27,1
17-01-2022	11:00:00	33,4	15,9
17-01-2022	12:00:00	18,2	11,7
17-01-2022	13:00:00	4	15,2
17-01-2022	14:00:00	-8,6	20,2
17-01-2022	15:00:00	-20	23,8
17-01-2022	16:00:00	-30,2	25,7
17-01-2022	17:00:00	-39,9	25,8
17-01-2022	18:00:00	-49,7	24,2
17-01-2022	19:00:00	-60	20,9

En la Figura 8.1.2 se muestra el comportamiento de la sombra según la hora para cada mes.



(a) Desde el amanecer hasta el atardecer.



(b) Sin horas extremas.

Figura 8.1.2: Sombra generada para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.

En la hora cercana al atardecer, debido a los ángulos de sol, se diferencia bastante el resultado frente a las demás horas, de ahí la razón de mostrar la Figura 8.1.2.b.

Al quitar del análisis esas horas con comportamiento elevado en la sombra, se puede decir que la suma de la sombra generada por todas las filas de paneles están en el rango entre 100 y 300 $[m^2]$, en general.

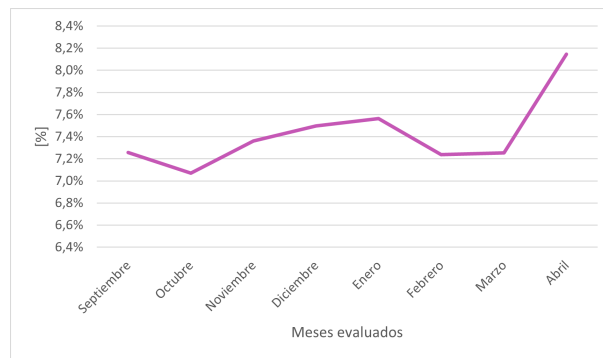


Figura 8.1.3: Variación promedio del porcentaje de área sombreada con respecto al área total de ensayo para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST), para cada mes.

En la Figura 9.1.5 se muestra el promedio de la variación del porcentaje del área sombreada con respecto al área total de ensayo. Debido a que esta es considerable, no sobrepasa el 9% de representación.

Se tiene un mayor porcentaje de noviembre a enero y luego en abril. Esto ocurre con motivo que, en estos meses, en la hora más temprana considerada, la radiación logra ser un valor positivo, por lo que se considera esta hora para la evaluación. En estas horas extremas, para todos los meses, se incrementa el área considerablemente (ver Figura 8.1.2.b) y de ahí que aumente su resultado frente a los demás meses.

8.2. Radiación

Al igual que el modelo anterior, este posee gráficos donde se puede ver visualmente el cambio de radiación entre una superficie sin sombra y otra con sombra (desde una perspectiva superior del terreno). En la Figura 8.2.1 se presenta su comportamiento para el mismo día exhibido en el modelo anterior.

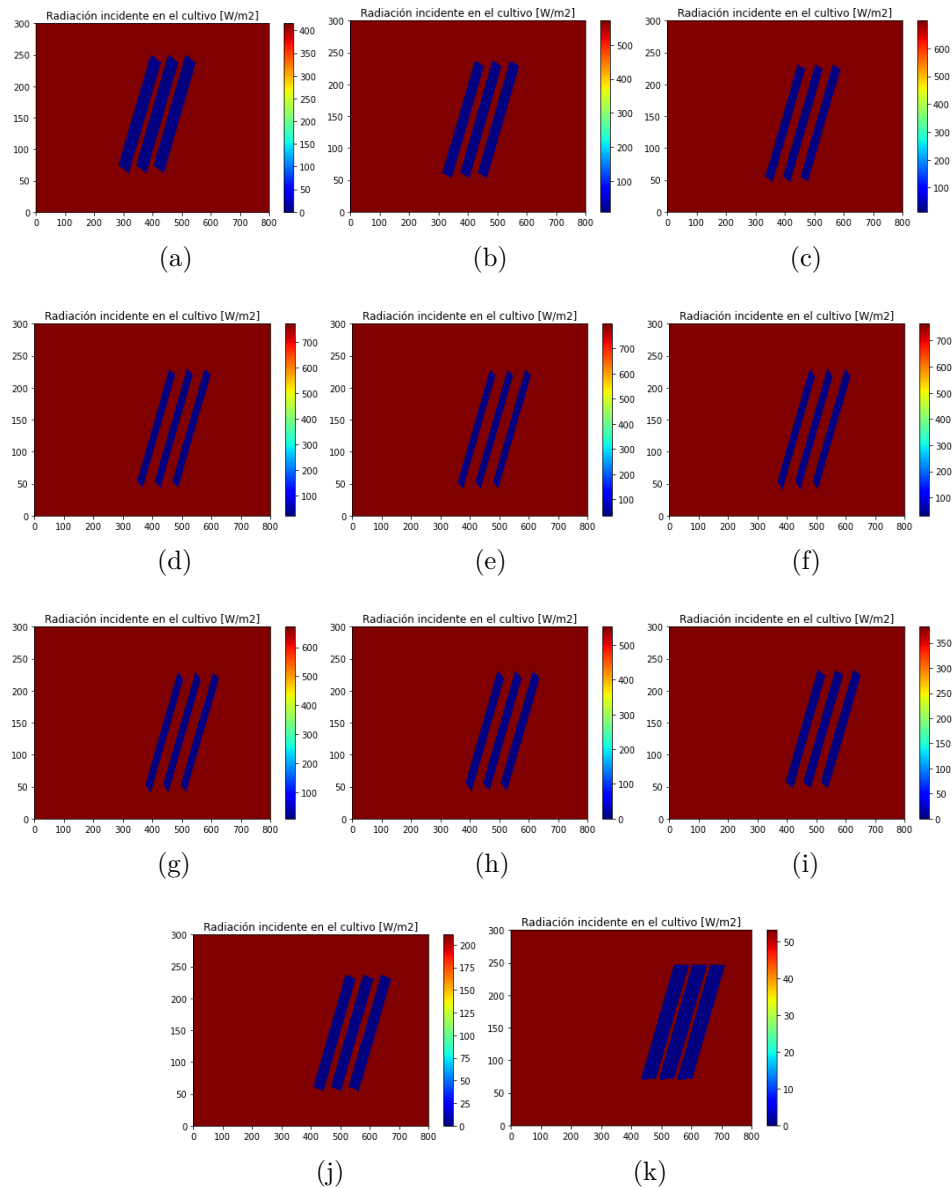


Figura 8.2.1: Radiación en el terreno para el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en un 17 de enero.

Entrando en más detalle en los resultados para todo el periodo de evaluación se encuentran varios factores interesantes de analizar. Se empieza por la comparación entre la radiación de onda corta entrante a un espacio sin sombra y a otro con, mostrado en la Figura 8.2.2.

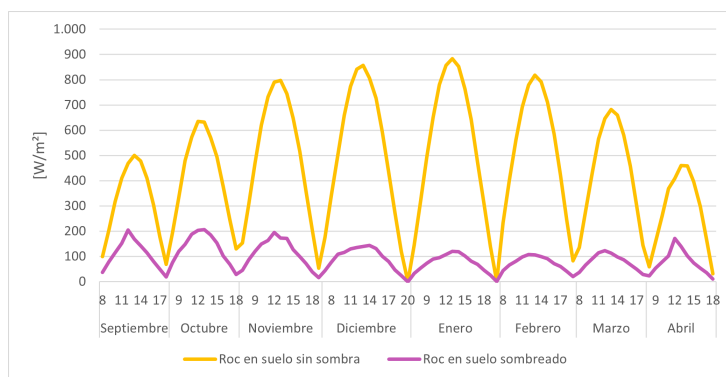


Figura 8.2.2: Comparación de la radiación de onda corta para una superficie sin sombra y otra con, para el proyecto agrivoltaico según cada mes.

Se nota una importante reducción en la radiación incidente a una zona con sombra, siendo el mínimo un 66,7% en septiembre y el máximo de 84,7% en febrero (mayor porcentaje en meses de verano por mayor radiación directa que sí llega a un espacio abierto, pero no a las zonas sombreadas por los paneles).

Ahora, en cuanto a la radiación de onda larga, esta tiene un rol más influyente en el resultado final que en el caso sin sombra. Esto se observa en la Figura 8.2.3.

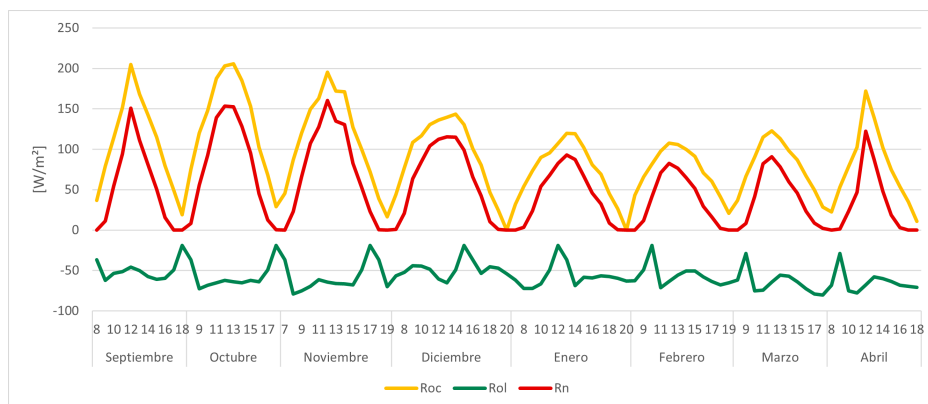


Figura 8.2.3: Radiación de onda corta, larga y neta para una zona sombreada del proyecto agrivoltaico.

Para un suelo sin sombra, en valor, la radiación de onda larga entrante representa en promedio un 15% de la radiación neta. En este caso este valor aumenta a un 33%. Es decir, influye en un tercio sobre el resultado, señalando así la importancia de considerar en el estudio la radiación de onda larga en los proyectos agrivoltaicos, en específico para las zonas sombreadas.

En suma, se genera una reducción del 86% en la radiación neta incidente al suelo en el espacio sombreado versus lo sucedido en el espacio no sombreado. Implicando un gran im-

pacto sobre la variación en radiación para los cultivos bajo esa zona.

Este valor es mayor que el 70 % de reducción en el estudio comentando en la Sección 3.1, en el cual se conseguía una reducción del 37 % de biomasa en Suiza. Si bien no es posible aseverar que en este caso la reducción en biomasa será mayor, ya que las condiciones de manejo de cultivo pueden ser distintas y esto incidir en los resultados (recordar que las condiciones climáticas eran similares), esto entrega un valor para tener en mente el efecto que se causará en este proyecto.

Ahora en lo referente al calor recibido por el suelo en todo el terreno, se presenta la Figura 8.2.4.

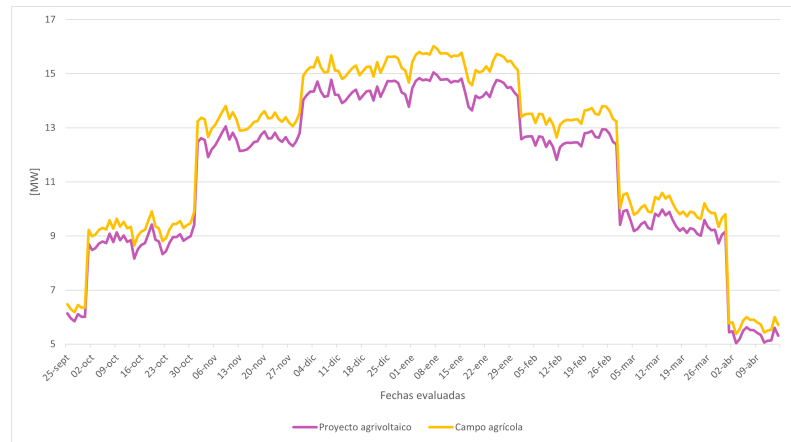


Figura 8.2.4: Comparación de calor recibido en todo el terreno entre el diseño de referencia del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) y el campo agrícola.

Se nota el mismo comportamiento ya mencionado, de un mayor efecto sustancial en meses con mayor radiación directa (noviembre a febrero). Por otro lado, la reducción con respecto al caso agrícola no es considerable (promedio diario de 5,9 %), debido a la gran dimensión del ensayo frente a la superficie de las sombras.

Si se analiza la reducción de calor en solo el área sombreada en todas las horas evaluadas, se encuentra una reducción de 89,2 % para CT/ST. Generando en ese pequeño espacio (con respecto a todo el terreno) un gran efecto.

Para finalizar esta sección, se concluye que el mayor impacto del proyecto agrivoltaico, será (por una gran diferencia) entre noviembre y febrero, y que la instalación de los paneles tiene un impacto sustancial en la radiación incidente al suelo en las zonas donde causan sombra.

8.3. Potencia generada

Primero es necesario resaltar que, si bien los paneles generarán electricidad todo el año, para poder comparar los resultados con los otros modelos, en este estudio se calcula lo que generan en el periodo de crecimiento de una cereza (periodo de evaluación).

En la Figura 8.3.1 se muestra el comportamiento de potencia generada por el sistema fotovoltaico.

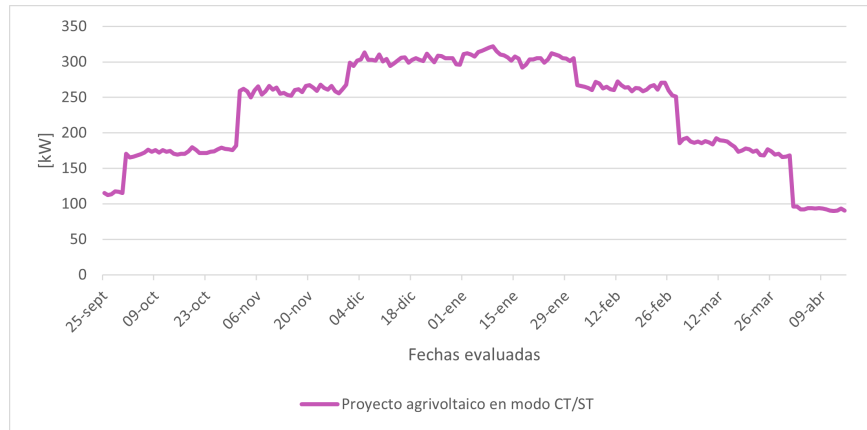


Figura 8.3.1: Potencia generada por el proyecto agrivoltaico con el diseño de referencia (modo de equilibrio CT/ST).

En todo el periodo de crecimiento de la cereza, logra sumar una generación de 47,2 [MWh].

8.4. Evapotranspiración

En cuanto a la pérdida de agua por evapotranspiración, se compara los resultados para este proceso del cultivo bajo condiciones estándar, ET_c , con las distintas unidades de medida.

Se comienza con ET_c en altura de agua. Es decir, el resultado que refleja el efecto de la reducción de radiación en el suelo de la zona sombreada, esto se muestra en la Figura 8.4.1.

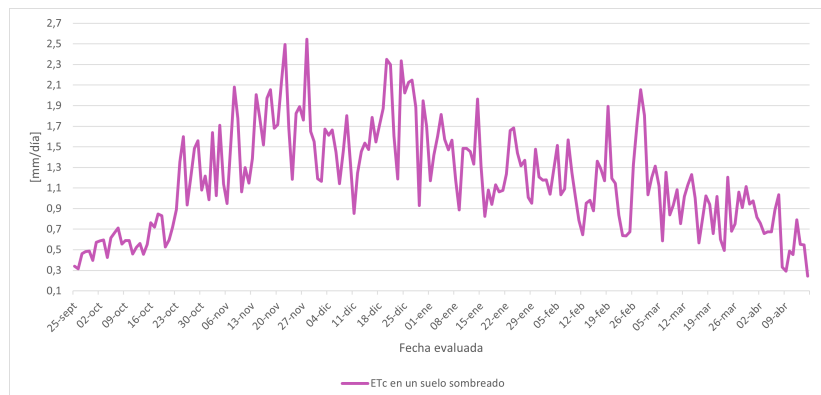


Figura 8.4.1: ET_c en altura de agua por día para una zona sombreada del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST) en el periodo de evaluación.

A pesar de no estar discutido en la sección anterior, se puede informar que el comportamiento diario del proceso de evapotranspiración mostrado en este gráfico no sigue el mismo comportamiento de la radiación neta. La razón de esto ya fue explicado para el campo agrícola, y esta es, que el factor único de cultivo (k_c) tiene una gran influencia en los resultados.

Se puede observar una gran variabilidad en las fechas evaluadas, no existe una tendencia clara como, por ejemplo, una tendencia similar a una parábola (hacia un máximo o mínimo) en todo este periodo; como sí sucede en los resultados mostrados anteriormente.

Pasando a la comparación con respecto al caso base, se puede informar que los valores son bastantes distantes, encontrando una reducción diaria en CT/ST de un 76 %. Esto es 10 % menos que la variación en radiación.

En esta misma línea, podría ser interesante el análisis horario de estos resultados.

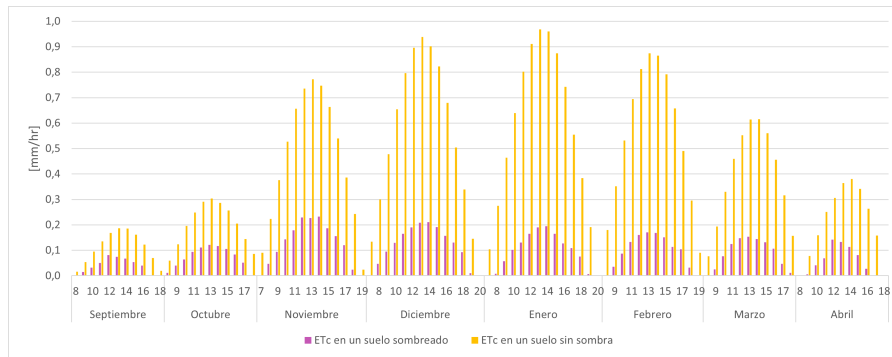


Figura 8.4.2: ET_c por hora en altura de agua para una zona sombreada y otra sin sombra del proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST).

De la Figura 8.4.2 se aprecia cómo se alcanza los máximos de pérdida de agua en distintas horas con respecto a un campo abierto (enero para este y noviembre para proyecto agrivoltaico en modo de equilibrio).

Continuando, con el resultado obtenido para todo el terreno de ensayo (considerando situaciones con sombra y sin) para el proyecto agrivoltaico, se muestra la Figura 8.4.3.

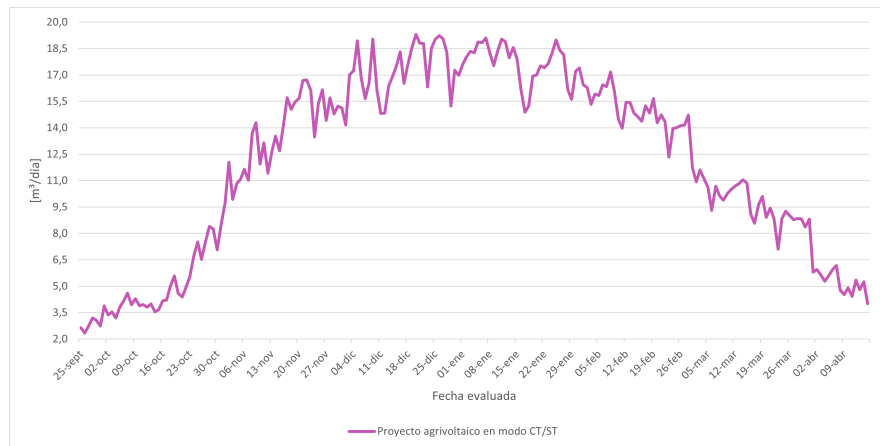


Figura 8.4.3: ET_c en volumen de agua para todo el terreno de ensayo en el proyecto agrivoltaico (modo de equilibrio CT/ST).

En esta se puede notar una clara tendencia de parábola en las fechas evaluadas, con un importante aumento de pérdida de agua desde el 6 de noviembre al 26 de febrero. Encon-

trando una similitud en tendencia con respecto al calor recibido en todo el terreno (Figura 8.2.4).

Debido a la magnitud del área considerada como ensayo es que el comportamiento variable de la Figura 8.4.1 no influye sustancialmente.

Finalmente, en la Tabla 8.4.1 se comparan los resultados para el campo agrícola y el proyecto agrivoltaico. Se encuentran tanto en altura de agua como en volumen. En donde, en la última es donde se realiza una suma por todo el área de ensayo (recordando que ambas tienen la misma área).

Tabla 8.4.1: ET_c en altura y volumen de agua para el terreno de ensayo en todo el periodo de evaluación, para el campo agrícola y el proyecto agrivoltaico en modo de equilibrio CT/ST.

	Agrícola	Agrivoltaico
ET_c [mm/periodo de evaluación]	1085	240
ET_c [m^3 /periodo de evaluación · área total terreno]	2.604	2.470

En la zona sombreada hay una reducción de pérdida de agua de 845 [mm] (22% con respecto al campo agrícola) y para todo el terreno de 134 [m^3] (5% con respecto al campo agrícola). Si bien una reducción del 5% no representa un impacto importante, el valor en volumen sí podría serlo. Sobretudo considerando el contexto de desabastecimiento de agua y el uso del sector agrícola de este recurso.

Finalmente, de la Figura 3.2.2 se puede notar como estos valores alcanzados en la pérdida de agua no son comparables con los niveles de precipitación. La lluvia es una forma de obtención de agua que puede ser pensada como una ayuda al riego.

Capítulo 9

Resultado y análisis del impacto de los parámetros de diseño

El modelo en su conjunto, expuesto en esta investigación, incluye diversos conceptos lo que entrega la oportunidad de analizar el efecto causado por estos sobre el resultado final. Así, se puede estudiar el efecto de la variación de:

1. Parámetros de diseño: Este tópico se aborda en el presente capítulo.
2. Componentes del microclima: Esto puede ser cambio de localidad o análisis de sensibilidad sobre la variación de estos para ciertas situaciones. El primer punto cambia la mayoría de los datos fijos: factores climáticos, posición del sol y por ende la posición de los paneles, entre otros.
3. Tipo de cultivo: Esto no solo incide en el factor k_c sino que a su vez también en los parámetros de diseño como la altura y distancia entre las filas de paneles.
4. Variación de tecnología fotovoltaica: Esto puede ser directamente en distintos tipos de paneles (distintas especificaciones técnicas y/o dimensiones). Si se requiere cambiar a paneles bifaciales se debe considerar la radiación reflejada en las ecuaciones de radiación que le llega al panel.
5. Distintos diseños fotovoltaicos: Se puede agregar al código creado en Python otro diseño como los verticales de la Figura 2.4.2.a, ya que simplemente se varía la posición de los paneles en el espacio.

Se ha considerado que sería de mayor utilidad evaluar el impacto de los parámetros de diseño. Para tal objetivo, en este capítulo se presenta el resultado y análisis de los parámetros más importantes sobre los distintos modelos.

Se va a considerar como caso de referencia al diseño comentando en el Capítulo 8.

9.1. Objetivos de diseño

El primer parámetro es la comparación entre los distintos objetivos de diseño, es decir, los modos de configuración.

A continuación, se compara los resultados generales de los modelos entre los modos más opuestos, es decir, entre Sun Tracking y Control Tracking. Esto se presenta en la Tabla 9.1.1.

Tabla 9.1.1: Análisis del resultado entre modos de configuración Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).

Alguna hora de algún día...	Cuántas veces?	Porcentaje con respecto al total de datos
Área de la sombra es mayor en modo ST?	2.454	100 %
El factor de visión es mayor en modo ST?	2.321	94,6 %
R_n en sombra es mayor en modo CT?	0	0 %
Q_{total} es mayor en modo CT?	2.260	92 %
Porcentaje de reducción de calor en todo el terreno es menor en modo CT?	2.260	92 %
ET_c , en altura de agua, es menor en modo ST?	36	1,5 %
ET_c , en volumen de agua, es menor en modo ST?	2.260	92 %
La capacidad generada por los paneles es mayor en modo ST?	2.429	92 %

En cuánto al área abarcada por la sombra, se puede mencionar que el modo Sun Tracking siempre genera más que el modo Control Tracking. Teniendo este último, en promedio, un 40 % de lo que genera Sun Tracking. A pesar de lo comentando en la Sección 6.2, este resultado da validez al cálculo en los ángulos de elevación para cada modo.

En el modelo de radiación hacia un espacio sombreado, los parámetros que diferencian los resultados según modo son la temperatura del panel y el factor de visión, ambos ligados en específico a la radiación de onda larga entre el panel y el suelo. La temperatura del panel para el modo Sun Tracking es siempre mayor que el opuesto, porque al seguir el sol y generar mayor electricidad, se calienta más.

Sobre el factor de visión se encuentra, en un 95 % de las horas evaluadas, un valor más alto para el modo Sun Tracking. Esto se debe a la orientación del panel frente a la posición de la sombra generada por este modo.

Como se observa en la Figura 9.1.1, esta radiación toma valores positivos, por lo que su influencia es contrarrestar el resultado en negativo de la radiación de onda larga entre el suelo y el aire.

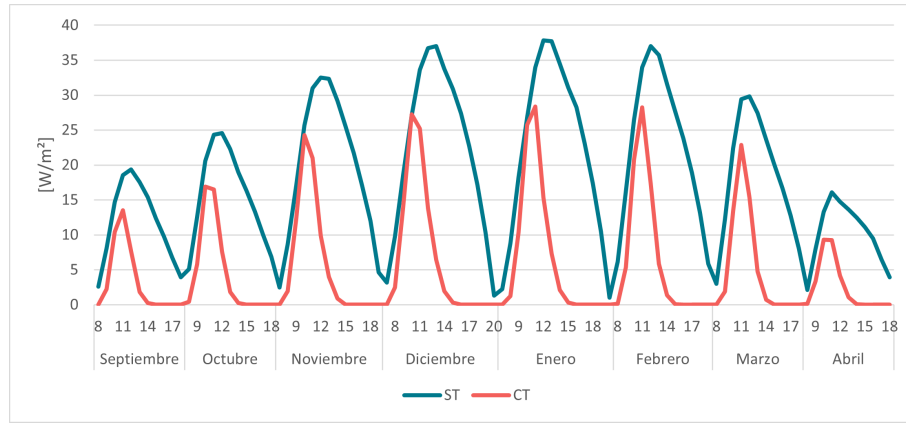


Figura 9.1.1: Radiación de onda larga entre el panel y el suelo en $[W/m^2]$ para todo el periodo de evaluación según modo de configuración.

De esta manera, en el modo Sun tracking es posible encontrar valores más altos en la radiación neta, R_n , como lo expresa la Tabla 9.1.1.

Podría ser contraintuitivo pensar que hay mayor radiación en el modo Sun Tracking, ya que la razón de la existencia de Control Tracking es para asegurar un bajo porcentaje de reducción en este parámetro. Pero este efecto se refleja cuando se considera que este último modo genera una menor superficie de sombra. Este efecto se muestra en Q_{total} . Donde en un 92% de los casos, el modo Control Tracking logra generar una suma mayor de calor recibido por el suelo en todo el terreno. Es decir, una menor reducción de radiación en todo el terreno considerado como ensayo.

La Tabla 9.1.1 muestra que solo en un 1,5% de todas las horas evaluadas, el modo Sun Tracking logra tener menores pérdidas de agua por parte de los cerezos en las zonas sombreadas, en términos de altura de agua. Lo anterior sigue la misma lógica presentada en la radiación. Ya que al considerar el área total, el comportamiento cambia su tendencia y así finalmente ET_c en volumen de agua (término que abarca la pérdida de agua con respecto a todo el terreno de ensayo) muestra un 92% de los casos con mayores pérdidas en modo Control Tracking.

Por último, la capacidad generada por el total de paneles considerados logra, en un 92% de los casos, ser mayor en modo Sun Tracking. La justificación en el porcentaje restante es la ya discutida en la Sección 6.3.

A continuación, se entrará en más detalle en los resultados por modelo.

9.1.1. Sombra

Para el modelo de sombra se muestra el comportamiento en la Figura 9.1.2 para el modo Sun Tracking, y en la Figura 9.1.3 para el modo Control Tracking, para el mismo día mostrado en el modo de equilibrio CT/ST en el capítulo anterior.

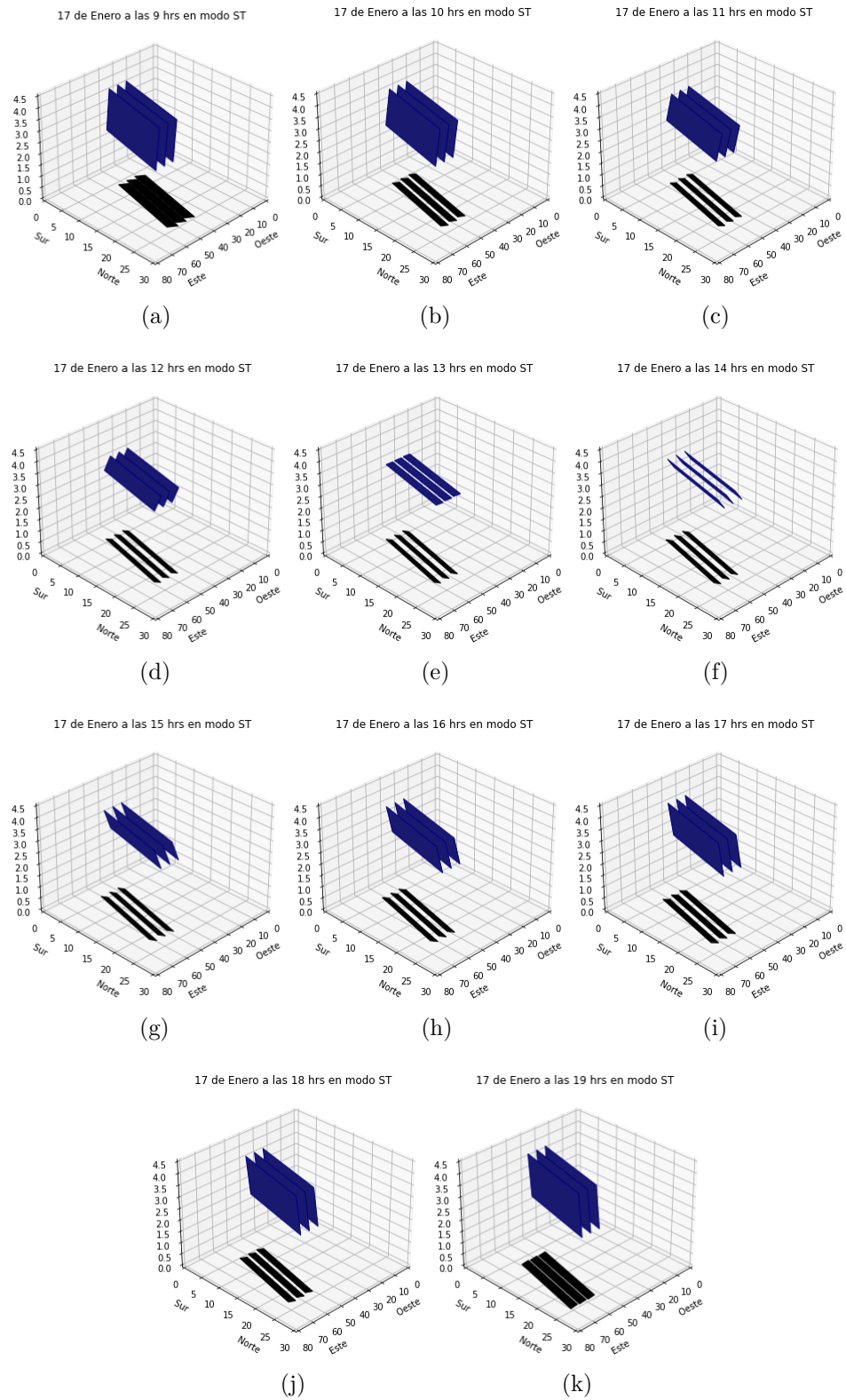


Figura 9.1.2: Sombra generada por los paneles para el modo Sun Tracking un 17 de Enero.

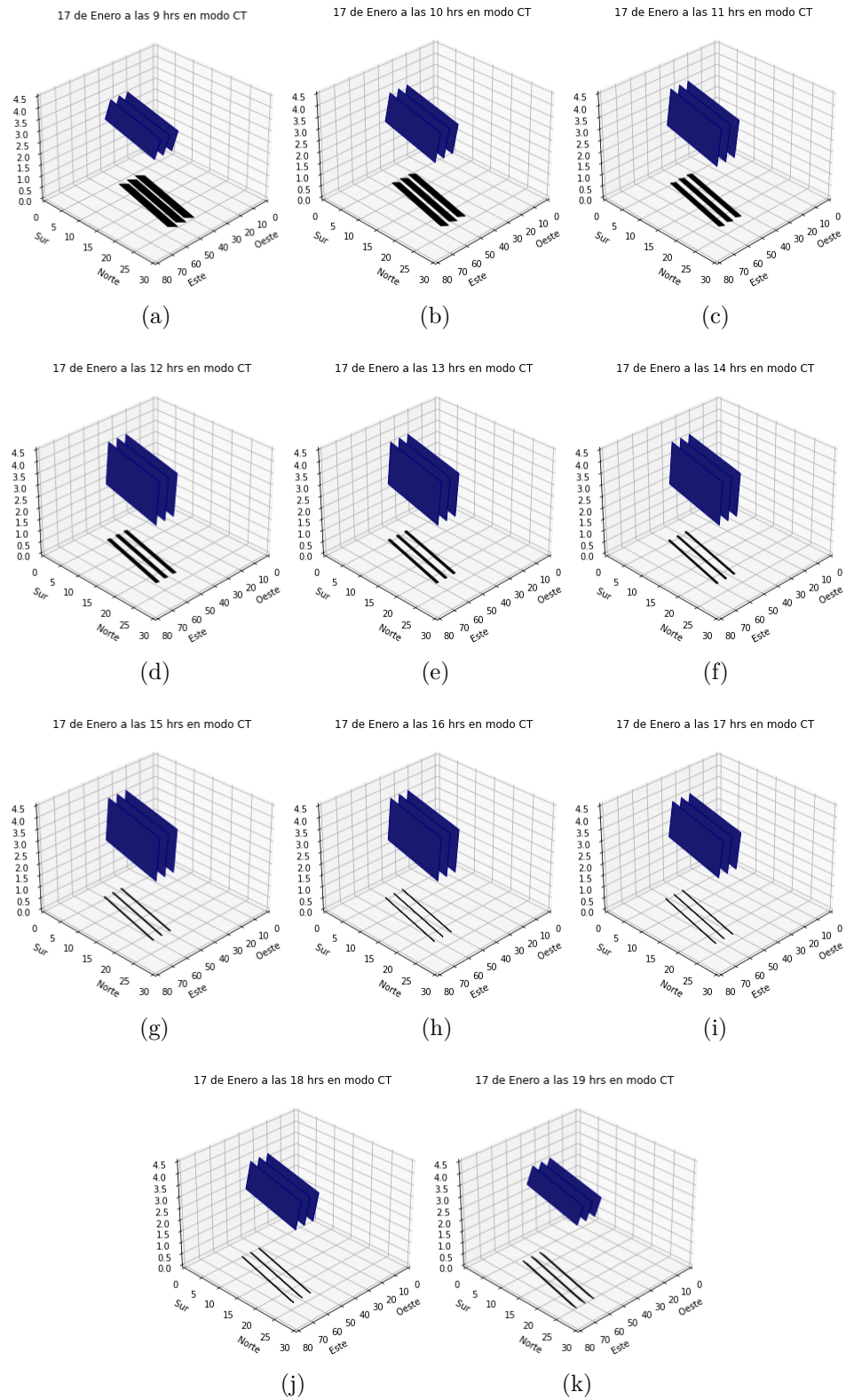


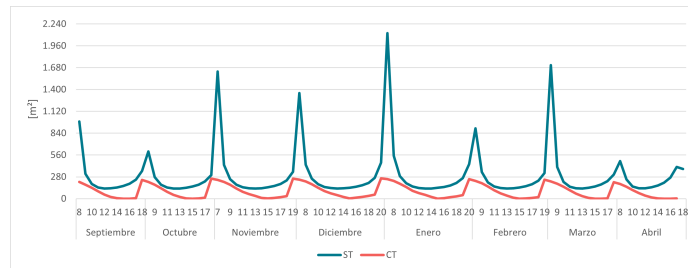
Figura 9.1.3: Sombra generada por los paneles para el modo Control Tracking un 17 de Enero.

En la Tabla 9.1.2 se informan los ángulos de cada modo para el día mostrado.

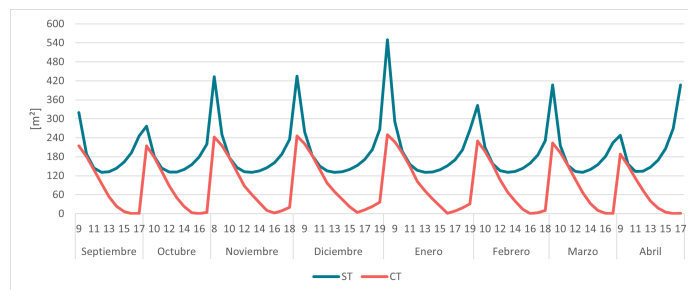
Tabla 9.1.2: Ángulo de elevación e incidencia para el 17 de Enero para los modos Sun Tracking (ST) y Control Tracking (CT).

Fecha	Hora	β [°]		θ [°]	
		ST	CT	ST	CT
17-01-2022	9:00:00	60	24,6	36,6	43,3
17-01-2022	10:00:00	48,8	36,8	25,7	27,1
17-01-2022	11:00:00	33,4	49,0	15,9	29,5
17-01-2022	12:00:00	18,2	60	11,7	46,8
17-01-2022	13:00:00	4,0	60	15,2	58,0
17-01-2022	14:00:00	-8,6	60	20,2	69,1
17-01-2022	15:00:00	-20,0	60	23,8	80,0
17-01-2022	16:00:00	-30,2	59,2	25,7	89,4
17-01-2022	17:00:00	-39,9	47,3	25,8	87,4
17-01-2022	18:00:00	-49,7	35,2	24,2	85,4
17-01-2022	19:00:00	-60	23,0	20,9	84,7

En la Figura 9.1.4 se muestra el comportamiento de la sombra según la hora y modo para cada mes.



(a) Desde el amanecer hasta el atardecer.



(b) Sin horas extremas.

Figura 9.1.4: Sombra generada en los modos Sun Tracking y Control Tracking para el proyecto agrivoltaico en función de la hora para cada mes del periodo de evaluación.

Como ya se comentó, hay un comportamiento elevado en los extremos, pero en este caso para Sun Tracking es en la hora cercana al amanecer y para Control Tracking en la hora cercana al atardecer.

De esta última se observa un periodo breve, de 10 a 12 hrs aproximadamente, en donde la diferencia es la mínima entre estos modos.

Por otro lado, Control Tracking presenta una considerable menor superficie abarcada por la sombra que CT/ST y Sun Tracking una mayor, sobretodo entre noviembre y enero.

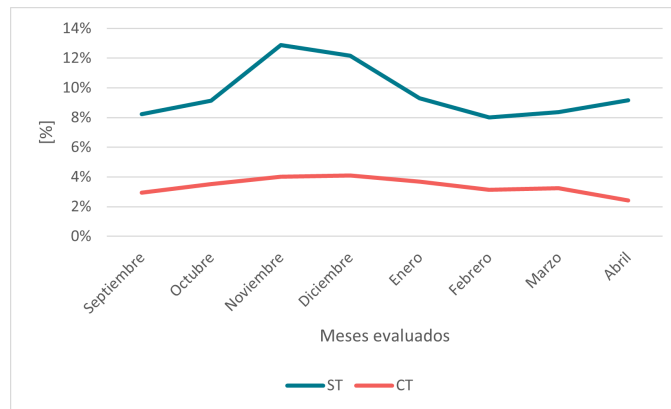


Figura 9.1.5: Variación promedio del porcentaje de área sombreada con respecto al área total de ensayo para los modos de Sun Tracking y Control Tracking, para cada mes.

En la Figura 9.1.5 se muestra el promedio de la variación para ambos modos. El modo Control Tracking es aproximadamente uniforme en todo el periodo y con bajos valores. En cambio en Sun Tracking se tiene un mayor porcentaje, al igual que el modo CT/ST presentado en el capítulo anterior, pero con mayor relevancia en valor.

9.1.2. Radiación

En las Figuras 9.1.6 y 9.1.7 se presenta la distribución de radiación incidente para los modos opuestos, nuevamente, para un 17 de enero.

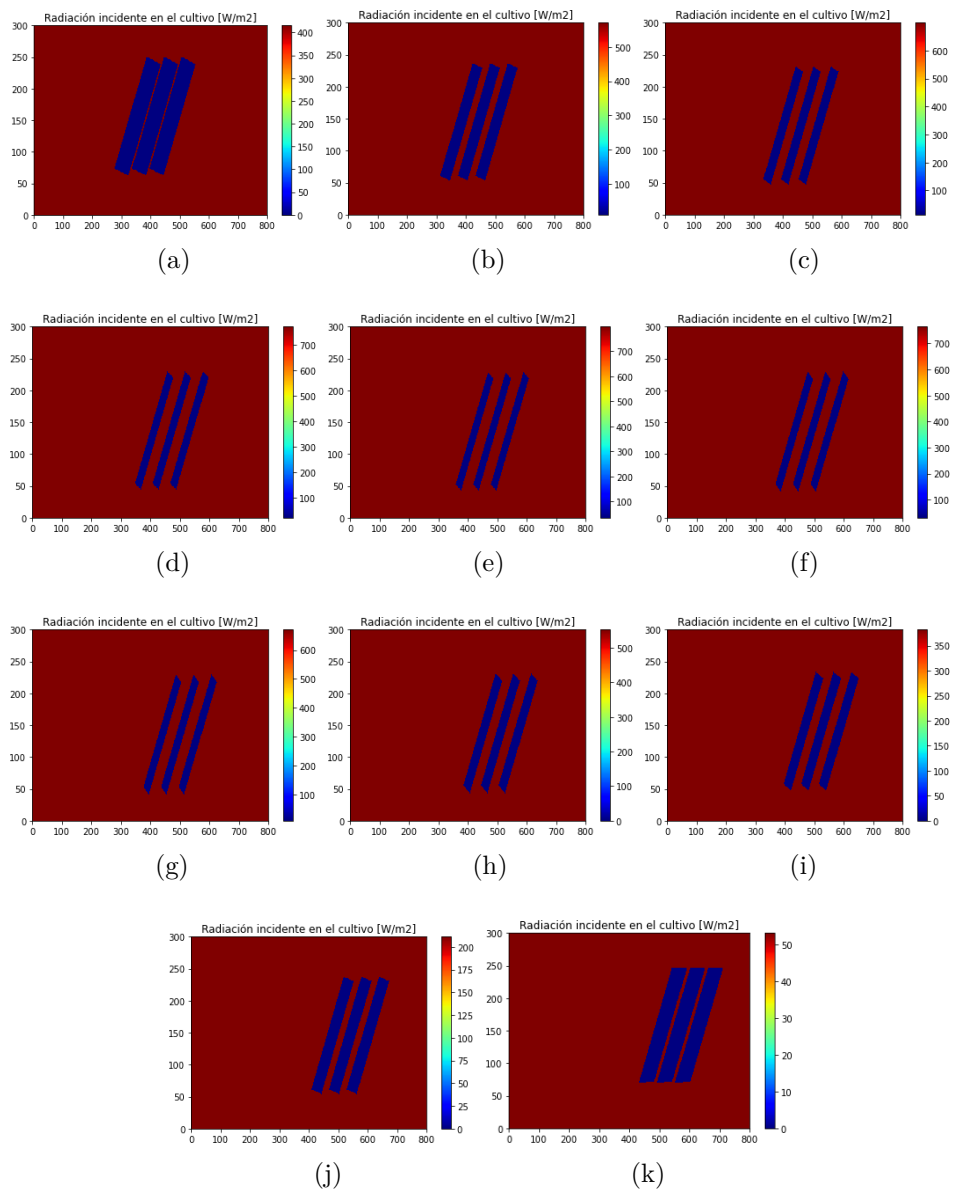


Figura 9.1.6: Radiación en el terreno para el proyecto agrivoltaico con modo Sun Tracking un 17 de enero.

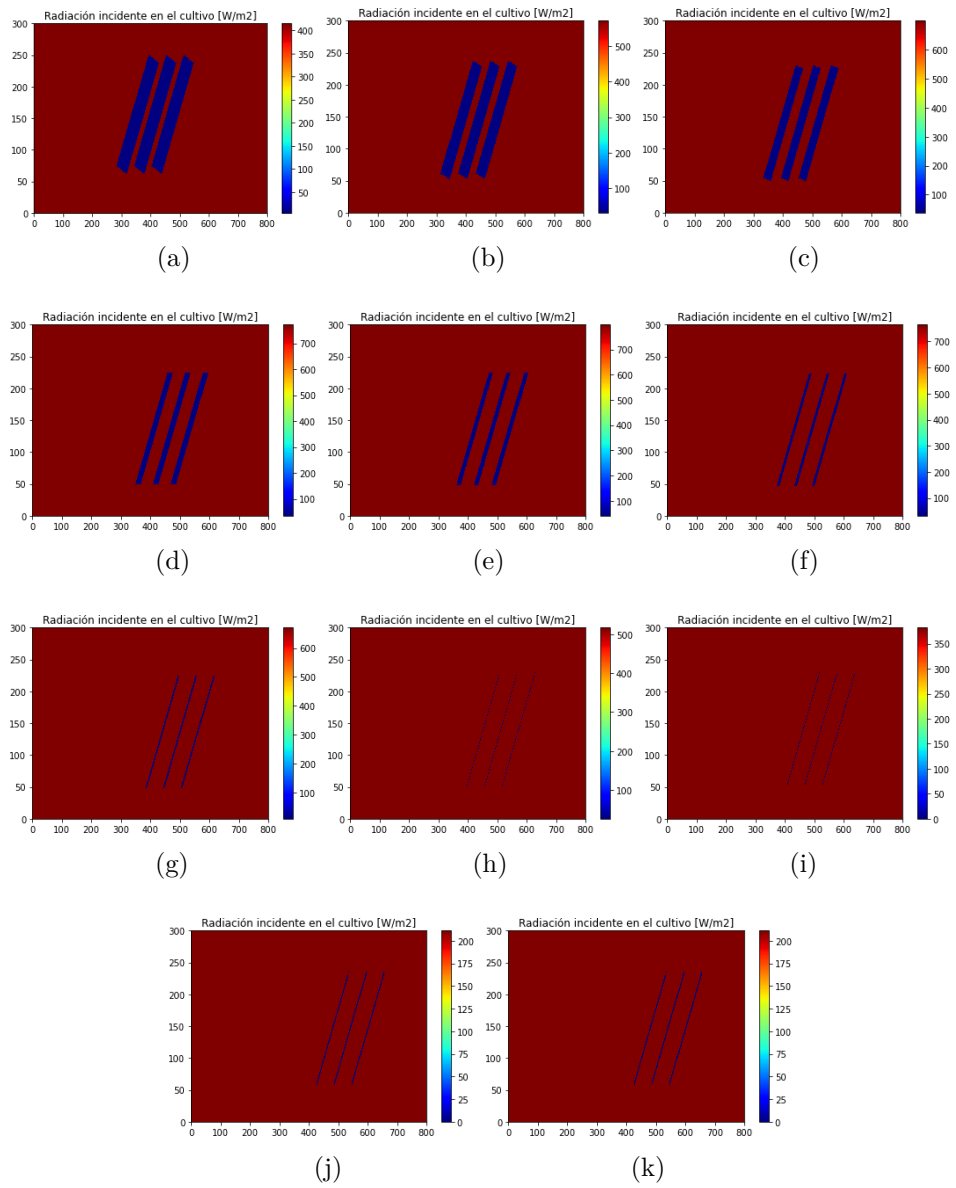


Figura 9.1.7: Radiación en el terreno para el proyecto agrivoltaico con modo Control Tracking un 17 de enero.

Como ya se comentó, el término que diferencia el resultado para cada modo de configuración es la radiación de onda larga, en específico el término entre el panel y el suelo. En la Figura 9.1.8 se muestra la variación en radiación de onda larga para estos modos.

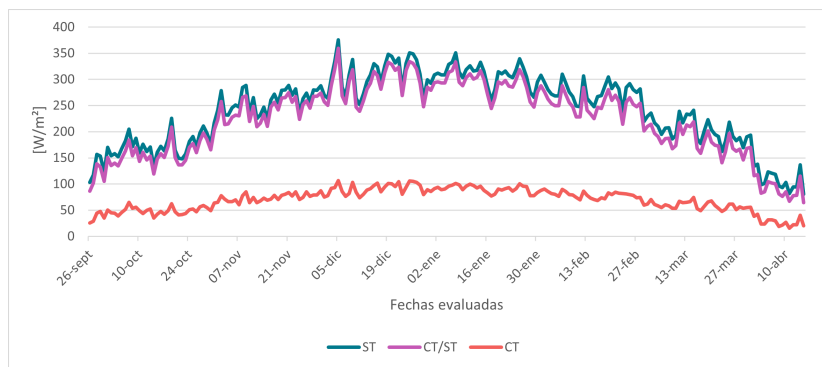


Figura 9.1.8: Radiación de onda larga entre el panel y suelo para cada modo.

Es interesante notar que frente al comportamiento del modo Control Tracking, el modo de equilibrio CT/ST parece tener una diferencia despreciable con respecto a Sun Tracking. De hecho, este modo representa en promedio diario un 92 % del valor resultado para Sun Tracking.

Por otro lado, los meses de mayor radiación directa no afectan de la misma forma al modo Control Tracking que a los demás.

En cuanto a valores, tanto para el modo Sun Tracking como el de equilibrio CT/ST, se tiene una influencia del 33 % al resultado neto de la radiación de onda larga y para Control Tracking de un 38 %.

Finalmente, la radiación neta al suelo sombreado, para los modos más opuestos, se muestra en la Figura 9.1.9.

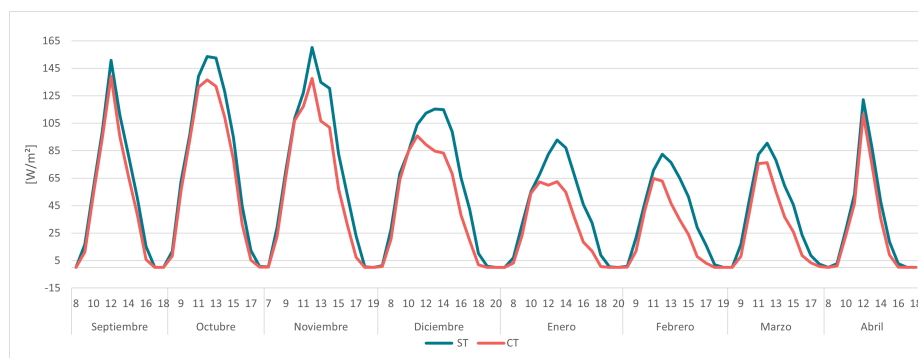


Figura 9.1.9: Radiación neta a un suelo sombreado para modo Sun Tracking y Control Tracking.

Como el resultado está en horas no se incluye la comparación con el modo CT/ST, porque este tiene una diferencia en valor que no se logra notar en los gráficos horarios (esto ocurre para todos los modelos).

De la Figura 9.1.9 se aprecia una mayor diferencia entre los modos desde horas cercanas al mediodía solar para los meses de mayores radiaciones solares (noviembre a marzo). Lo que llama bastante la atención, porque a pesar de no tener una relación directa, esto mismo

ocurre para la generación de sombra. Y podría ser la explicación de por qué el modo de equilibrio CT/ST presenta resultados tan similares al Sun Tracking.

Otro aspecto es que los máximos no ocurren a la misma hora para ambos modos, en ciertos meses.

Podría ser importante tener en consideración que septiembre y abril cuentan con menos días evaluados (6 y 15, respectivamente), lo que podría explicar la baja variación entre modos en estas fechas. Notando nuevamente el efecto de la variabilidad horaria y diaria de los resultados.

La diferencia de radiación neta horaria entre estos modos llega hasta un valor considerable de $32,3 [W/m^2]$ en enero. De todas formas, al sacar el promedio diario, el modo Control Tracking representa un 76 % del valor obtenido en Sun Tracking.

Ahora, pasando a la comparación entre la radiación incidente a un suelo sombreado versus a uno sin sombra, se muestra la Figura 9.1.10.

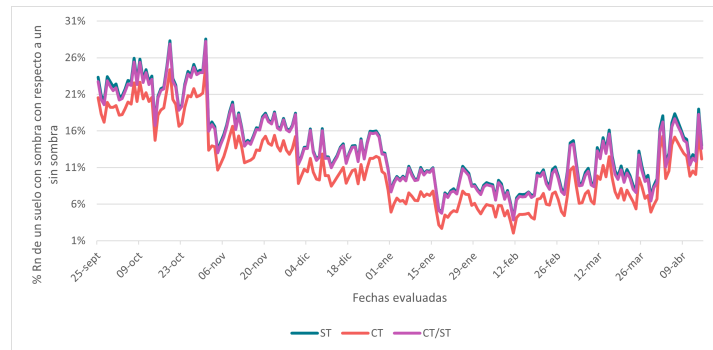


Figura 9.1.10: Porcentaje de radiación neta de un suelo sombreado con respecto a un suelo sin sombra para todos los modos.

El modo Sun Tracking es más cercano al caso base con un promedio diario de 14% del valor de este, luego le sigue el modo de equilibrio CT/ST con un 13,7% y al final Control Tracking con un 11%. Implicando un gran impacto en la reducción de radiación en la zona sombreada para todos los modos.

Ahora en lo referente al calor recibido por el suelo en todo el terreno para cada modo, se presenta la Figura 9.1.11 (la que además compara estos resultados con el caso base).



Figura 9.1.11: Comparación de calor recibido en todo el terreno para el proyecto agrivoltaico en cada modo y el campo agrícola.

Se nota el mismo comportamiento ya mencionado, de mayor efecto en meses con mayor radiación directa y la notoria cercanía entre los resultados de Sun Tracking y el de equilibrio CT/ST.

Por otro lado, la reducción con respecto al caso agrícola no es considerable para ningún modo, debido a la gran dimensión del ensayo frente a la superficie de las sombras. Sun Tracking posee un promedio diario de 6,9 %, CT/ST un 5,9 % y Control Tracking un 3,1 %.

Si analizamos la reducción de calor en solo el área sombreada en todas las horas evaluadas, en donde es posible comparar solo frente al caso base (radiación global en una superficie igual a la del área sombreada) no entre modos (por la gran diferencia de área abarcada entre ellos), se encuentra una reducción de 88,8 % para Sun Tracking, 89,2 % para CT/ST y 91,5 % en Control Tracking. Resultando así, valores elevados y cercanos entre modos.

Para finalizar esta sección, el resultado más llamativo y relevante es la gran cercanía en los resultados de los modos Sun Tracking y el de equilibrio CT/ST. También se nombra el notable mayor efecto sobre los meses entre noviembre y febrero para todos los objetivos de diseño y la importante diferencia en radiación neta incidente al suelo sombreado entre los modos más opuestos.

9.1.3. Potencia generada

En la Figura 9.1.12 se muestra el comportamiento de potencia generada por el sistema fotovoltaico para cada modo de configuración.

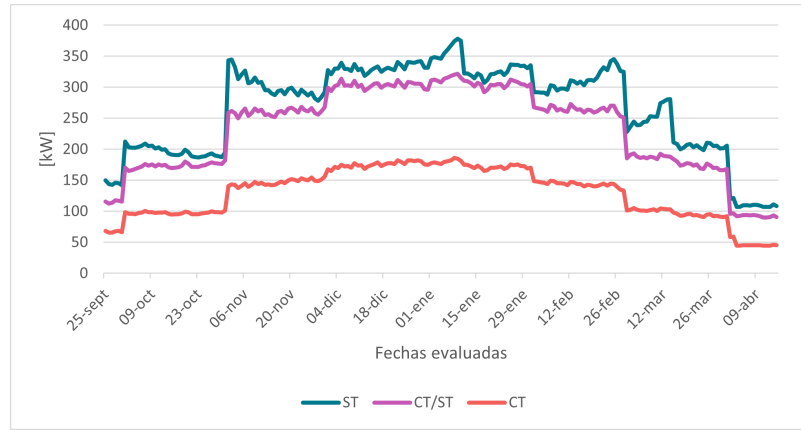


Figura 9.1.12: Generación por la planta fotovoltaica para cada modo de configuración.

Como se puede esperar, el modo Sun Tracking es el que genera mayor capacidad con una gran diferencia con el modo Control Tracking, de un promedio de 102 [kWh] diario.

Si bien con el modo de equilibrio CT/ST se ve una cercanía visual en la Figura 9.1.12, en ciertos días se encuentra una diferencia de 93 [kWh], lo que no es un valor menor. Sin embargo, al tomar el promedio diario se llega a 34 [kWh] de diferencia, presentado un mayor porcentaje de diferencia con los resultados de Sun Tracking que el modelo de radiación.

En todo el periodo de crecimiento de la cereza, cada modo lograr sumar una potencia generada mostrada en la Tabla 9.1.3.

Tabla 9.1.3: Generación de los paneles en el periodo de evaluación según el modo de configuración.

	ST	CT/ST	CT
Generación en un año [MWh]	54,1	47,2	26,4

Existe una sustancial diferencia entre los modos más opuestos (49%) y una cercanía del modo de equilibrio CT/ST al caso más favorable en generación, pero menor que en el modelo de radiación.

9.1.4. Evapotranspiración

En cuanto al comportamiento de pérdida de agua en un suelo sombreado para todos los modos, se muestra la Figura 9.1.13.

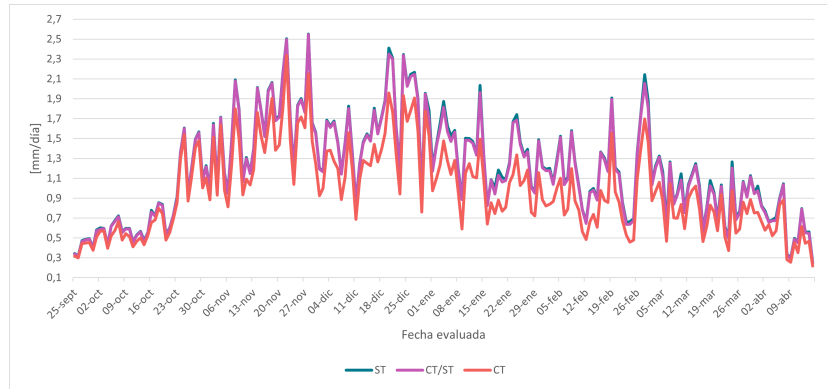
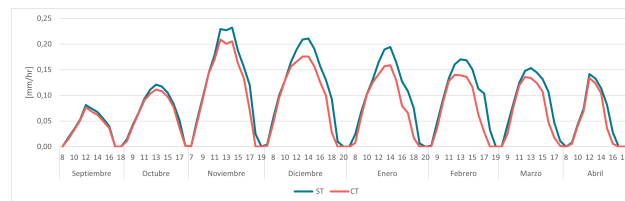


Figura 9.1.13: ET_c en altura de agua para un suelo sombreado según el modo en el periodo de evaluación.

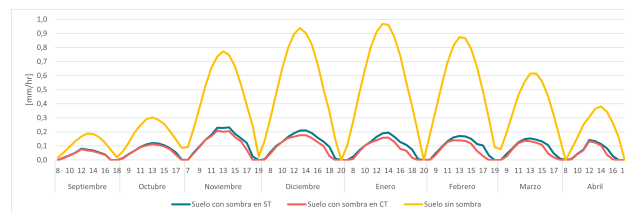
Llama la atención, la cercanía en resultados para todos los modos de configuración. Las mayores pérdidas la tiene Sun Tracking, le sigue el modo de equilibrio CT/ST y finalmente Control Tracking. La diferencia entre los primeros dos nombrados, es en promedio de $0,017 [mm/día]$ y entre los modos más opuestos es de $0,215 [mm/día]$.

Pasando a la comparación de estos resultados con respecto a una zona no sombreada, se puede informar que los valores son bastantes distantes, encontrando una reducción diaria en Sun Tracking de un 75,6 %, 76 % para CT/ST y 80 % para Control Tracking. De donde se nota la menor variación, para todos los modos de configuración, al compararlo con lo que sucede en el modelo de radiación.

En esta misma línea, podría ser interesante el análisis horario de estos resultados.



(a) ST y CT.



(b) Con respecto a un suelo sin sombra

Figura 9.1.14: ET_c en altura de agua hacia un suelo sombreado para los modos Sun Tracking y Control Tracking, y luego comparado con un suelo sin sombra.

De la Figura 9.1.14.a se observa una diferencia entre el comportamiento de los modos al compararlo con el modelo de radiación neta (ver Figura 9.1.9).

Si se grafica el comportamiento de ET_c en volumen de agua para todo el terreno de ensayo según el modo, no es posible contrastar el rendimiento de cada uno. Por esta razón, se presenta la Figura 9.1.15 la que muestra el porcentaje de reducción diario de ET_c en volumen con respecto al caso agrícola.

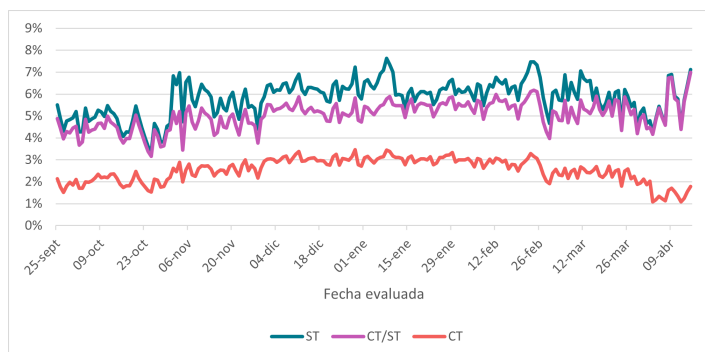


Figura 9.1.15: Reducción de ET_c en volumen de agua de cada modo con respecto al caso agrícola para las fechas evaluadas.

En esta se observa la tendencia esperada con el modo Sun Tracking teniendo mayor reducción en pérdidas. Estos resultados son considerablemente uniformes en el periodo de evaluación, con un leve aumento en los meses de mayor radiación directa.

Por otro lado, se puede notar un comportamiento distinto entre los modos más opuestos según la fecha. Lo cual llama la atención, porque esto no se observa para el modelo de radiación (Figura 9.1.10). Esto no sigue la tendencia de k_c , por lo que la única alternativa es que se esté presente frente al efecto de los demás componentes del microclima. Primero es necesario destacar que se está analizando a una escala muy pequeña (menor del 8%), pero no deja de ser llamativo, porque implicaría que al proceso de evapotranspiración en los proyectos agrivoltaicos, la humedad relativa del agua, la velocidad del viento y las temperaturas del aire y suelo, tendrían un rol más incidente que en un campo abierto sin sombras.

Finalmente, en la Tabla 9.1.4 se muestra la suma de pérdida de agua para cada modo en todo el periodo de evaluación.

Tabla 9.1.4: ET_c en altura y volumen de agua para el terreno de ensayo en todo el periodo de evaluación, para los distintos modos del proyecto agrivoltaico.

	ST	CT/ST	CT
ET_c [mm/periodo de evaluación]	243	240	199
ET_c [m^3 /periodo de evaluación · área total terreno]	2.448	2.470	2.533

Hay que destacar la mayor cercanía, en comparación a los otros modelos, entre los resultados de todos los modos de configuración y sobretodo entre el modo de equilibrio CT/ST y Sun Tracking.

Comparando con el campo agrícola, los resultados en volumen siguen siendo importantes y se tiene una reducción de 156 [m^3] para Sun Tracking, 134 [m^3] para el de equilibrio CT/ST y 71 [m^3] para Control Tracking.

En definitiva, considerando los resultados para todos los modelos y modos de configuración, todo indica que el modo de equilibrio CT/ST muestra los mejores valores al considerar que este intenta priorizar el desarrollo del cultivo en las mañanas. Esto porque se encuentra muy cercano a los valores obtenidos en modo Sun Tracking.

9.2. Hora de cambio en modo CT/ST

Otro aspecto del cual se analiza el impacto, es la hora de cambio de modo de Control Tracking a Sun Tracking en el modo de equilibrio.

Este es el parámetro más difícil de escoger debido a que no existe una relación teórica entre la cantidad de radiación y el desarrollo del cultivo, en particular del cerezo.

Como ya se mencionó en la Sección 3.1, se recomienda que los cerezos tengan entre 6 y 8 horas de luz del día. Considerando esto, es que se escoge evaluar los resultados para: 1) Cambio de modo de Control Tracking a Sun Tracking a partir de las 12 horas para todos los meses, lo que implica una suma entre 5 y 6 horas de luz, dependiendo del mes. 2) Cambio de hora a las 13 para todos los meses, teniendo aquí una suma de horas entre 6 y 7. Esto se presenta en la Tabla 9.2.1.

Se recuerda que las horas de cambio del caso base están en la Tabla 4.1.1.

A partir de estos resultados solo se evalúa el impacto en los modelos desarrollados en esta investigación, no se discutirá la influencia sobre el crecimiento del fruto.

Tabla 9.2.1: Horas consideradas en la variación de cambio de hora en el modo de equilibrio CT/ST, para cada caso en función de cada mes.

Mes	Caso de referencia			Caso 1: Aumento en 1 hora			Caso 2: Aumento en 2 horas		
	Hora hasta que funciona CT	Horas de luz	Porcentaje de radiación en ST	Hora hasta que funciona CT	Horas de luz	Porcentaje de radiación en ST	Hora hasta que funciona CT	Horas de luz	Porcentaje de radiación en ST
Septiembre	12:00	5	70 %	12:00	5	70 %	13:00	6	56 %
Octubre	11:00	5	77 %	12:00	6	65 %	13:00	7	52 %
Noviembre	11:00	5	75 %	12:00	6	64 %	13:00	7	52 %
Diciembre	11:00	5	76 %	12:00	6	65 %	13:00	7	53 %
Enero	11:00	5	78 %	12:00	6	67 %	13:00	7	56 %
Febrero	11:00	4	80 %	12:00	5	69 %	13:00	6	57 %
Marzo	11:00	4	82 %	12:00	5	71 %	13:00	6	58 %
Abril	12:00	5	72 %	12:00	5	72 %	13:00	6	59 %

En la Tabla 9.2.1 se muestra la cantidad de horas de luz por cada caso el cual depende del mes y el porcentaje de radiación global que queda disponible para que el modo Sun Tracking utilice, con respecto a la suma de todo un día representativo.

Para el caso utilizado de referencia se tiene en promedio un 76 % de la radiación global total destinada para ser utilizada en el modo Sun Tracking, al fijarla a las 12 hrs resulta en 68 % y finalmente al fijarla en 13 hrs se tiene un 55 %.

Es importante mencionar que podría ser útil agregar algún análisis económico para en-

contrar un equilibrio entre el impacto al cultivo y la rentabilidad del proyecto. En esta investigación se cuantifica las variaciones para los distintos modelos, pero no se hará una recomendación más acabada.

El impacto directo de estas variaciones es hacia la radiación neta de un día, como se puede ver en la Figura 9.2.1.

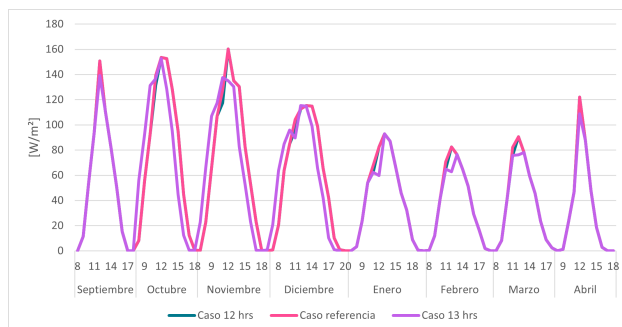


Figura 9.2.1: Radiación neta para el caso de referencia (diseño base), el caso 12 hrs y el caso 13 hrs.

Al aumentar la hora en modo Control Tracking se disminuye la radiación que llega a la zona sombreada. En la tabla 9.2.2 se muestra cuánto disminuye según el caso.

Tabla 9.2.2: Variación mensual a partir de un promedio para todos los días, para la radiación neta en $[W/m^2]$ de cada caso con respecto al caso de referencia.

Mes	Variación de R_n en $[W/m^2]$	
	Caso 12 hrs	Caso 13 hrs
Septiembre	0	-11,7
Octubre	-7,9	-24,8
Noviembre	-10,0	-32,6
Diciembre	-8,4	-31,3
Enero	-5,6	-28,1
Febrero	-5,8	-25,4
Marzo	-6,6	-21,0
Abril	0	-13,2
Promedio	-5,5	-23,5

Se nota una considerable diferencia entre ambos casos, debido a que al avanzar en las horas del día la radiación va aumentando y así se impacta más en los resultados.

Al igual que muchos resultados, el mayor efecto se contempla en los meses de mayor radiación solar directa.

Tabla 9.2.3: Porcentaje de variación mensual a partir de un promedio para todos los días, para la radiación neta de cada caso con respecto al caso de referencia.

Mes	Porcentaje de variación en R_n	
	Caso 12 hrs	Caso 13 hrs
Septiembre	0 %	-2,1 %
Octubre	-0,9 %	-2,8 %
Noviembre	-1,1 %	-3,6 %
Diciembre	-1,0 %	-3,8 %
Enero	-1,0 %	-5,2 %
Febrero	-1,3 %	-6,0 %
Marzo	-1,6 %	-5,0 %
Abril	0 %	-3,9 %
Promedio	-1 %	-4 %

En la Tabla 9.2.3 se muestra cómo el mayor impacto no necesariamente se relaciona con los mayores valores de diferencia. De todas formas, sigue estando el mayor impacto en los meses de verano, pero hacia el fin de esta estación.

Al igual que los otros parámetros, aquí se concluye que se debe diseñar para los meses de mayor radiación solar directa. Hay que considerar que en esta investigación no se incluyen los meses más fríos, pero se logra notar una baja de impacto hacia ese lado.

Ahora, si se considera el calor recibido en todo el terreno de ensayo, como podrá esperar el lector, se notará un cambio de tendencia. En la Tabla 9.2.4 se muestra esto.

Tabla 9.2.4: Variación diaria promedio para cada mes entre cada caso y el caso de referencia, de calor recibido en el suelo en [kW].

Mes	Variación en Q_{total} [kW]	
	Caso 12 hrs	Caso 13 hrs
Septiembre	0	7,8
Octubre	2,5	19,0
Noviembre	6,3	29,8
Diciembre	5,8	29,5
Enero	3,1	25,5
Febrero	0,3	16,3
Marzo	-0,7	9,9
Abril	0	12,7
Promedio	2,2	18,8

En esta se nota un aumento del calor entregado al suelo, al considerar todo el terreno.

Existen varios análisis. Primero, que el mayor impacto sigue la misma tendencia que la radiación neta, como era de esperar. Segundo, que para el caso de 12 hrs, en los meses de mayor impacto en porcentaje (febrero y marzo) el calor no aumenta sino que disminuye. Esto se debe a que el área de la sombra no presenta una gran variación como en los otros meses (entre la sombra generada por el modo Sun Tracking versus Control Tracking). Febrero presenta una variación de 2,2 [m^2], marzo 0,7 [m^2] y el rango de los demás meses están entre 6 y 14 [m^2]. En resumen existe un gran impacto en la radiación, pero uno bajo en el área tal que el calor recibido por todo el terreno no aumenta sino que disminuye.

Hay que recordar que en la Tabla 9.2.2 se muestran valores altos, pero estos están asociados a áreas pequeñas (superficie sombreada), que representan un 0,02 % sobre todo el terreno en el caso 12 hrs y un 0,2 % en el caso de 13 hrs. Y lo anterior impacta en que al comparar con el caso de referencia en donde se tenía Sun Tracking de seguimiento (mayor sombra y valores de radiación neta en el suelo) existe un aumento del calor recibido en el suelo por tener estas zonas, que antes estaban sombreadas, ahora ya no estando y aumentando enormemente la radiación que llega.

La utilidad de aumentar más o menos el calor recibido por el suelo, dependerá de las necesidades del cultivo. Aquí se presenta como el cambio en uno o dos horas (considerando horas de altas radiaciones) puede aumentar de forma importante la radiación en el suelo. Pero esto puede traer un efecto negativo en la generación de electricidad.

En cuanto a la potencia generada por los paneles fotovoltaicos, en la Tabla 9.2.5 se puede observar el resultado de esta en todo el periodo de evaluación.

Tabla 9.2.5: Generación por los paneles para cada caso de la variación en el cambio de hora del modo de equilibrio CT/ST, en todo el periodo de evaluación en [MWh]

	Caso referencia	Caso 12 hrs	Caso 13 hrs
Generación en un año [MWh]	47,2	46,2	44,4

Existe una gran disminución con respecto al caso de referencia al fijar la hora a las 13, y al solo bajarla en una hora se produce una variación de 1 [MWh], lo cual es bastante.

Para terminar, el resultado en evapotranspiración muestra un comportamiento interesante y este se puede ver en la Tabla 9.2.6.

Tabla 9.2.6: Variación de evapotranspiración en altura y volumen de agua, para los dos casos, del cambio de hora del modo de equilibrio CT/ST, con respecto al caso de referencia en todo el periodo de evaluación

	Caso 12 hrs	Caso 13 hrs
ET_c sombra [mm/periodo de evaluación]	-1,1	-4,6
ET_c en volumen [m^3 /periodo de evaluación · área total terreno]	0,5	3,7

Primero es necesario recalcar que existe un impacto mayor en la zona con sombra, pero

al considerar lo ocurrido en todo el terreno de ensayo esta tendencia cambia hacia el lado contrario (la razón de esto ya ha sido ampliamente explicada en el estudio). De esta forma, el aumento de horas en modo Control Tracking en las mañanas causa una mayor pérdida de agua que el caso de referencia.

Por otro lado, se nota un claro mayor efecto para el caso de las 13 hrs, al igual que en los otros modelos.

Recapitulando los resultados obtenidos, se puede resumir que al disminuir una hora en modo Sun Tracking o aumentar una hora en modo Control Tracking (para la mayoría de los meses), se disminuye 1 [MWh] con tal de disminuir en promedio diario $5,5 [W/m^2]$ en la zona sombreada (la cual tiene una menor superficie), y así aumentar 2,2 [kW] de calor en el terreno provocando un aumento de $0,5 [m^3]$ en la pérdida de agua.

Esto representa una leve variación en radiación y pérdida de agua, pero una gran afectación a la potencia generada y el calor recibido por el suelo (que incide en el crecimiento del producto agrícola). Como se dijo en un inicio no es posible realizar una conclusión de si esto representa un efecto positivo o negativo, porque depende de los objetivos que busca lograr el proyecto agrivoltaico (priorización sobre producción agrícola o electricidad).

Este resultado implica mayor valor en todos los modelos cuando se tiene un proyecto agrivoltaico a mayor escala, tal que las sombras generadas por los paneles son más en cantidad (por el número de filas de paneles y el largo de cada una, que depende del número de paneles). Este parámetro será discutido al final del capítulo.

9.3. Altura de la plataforma

Este parámetro está restringido por la altura del árbol cerezo. También se podría considerar las dimensiones de maquinarias usadas en los campos agrícolas, pero en este caso estas son más bajas que los cerezos.

Se recuerda que el rango encontrado en la altura está dentro de los 2,5 y 4 [m], y que el diseño propuesto considera a la altura de la plataforma como 3,5 [m]. Debido a esto, se evalúa los resultados para 3, 4 y 4,5 [m].

A continuación se analiza los resultados según modo, y el caso de referencia es para cada modo según el diseño de referencia (respectivas dimensiones).

9.3.1. Sombra

Al comparar los resultados al disminuir o aumentar la altura de la plataforma con respecto al caso de referencia, se obtiene un resultado interesante en la sombra. Esto es, que no sigue una tendencia completa hacia una disminución o aumento de esta, sino que varía dependiendo de la hora (hay aumentos y disminuciones) y del mes (el comportamiento cambia de un mes a otro). Pero todo esto en pequeña escala, casi despreciable.

Para mostrar este interesante comportamiento es que se presenta la Figura 9.3.1, la cual

presenta los resultados para Sun Tracking al disminuir la altura a 3 [m].

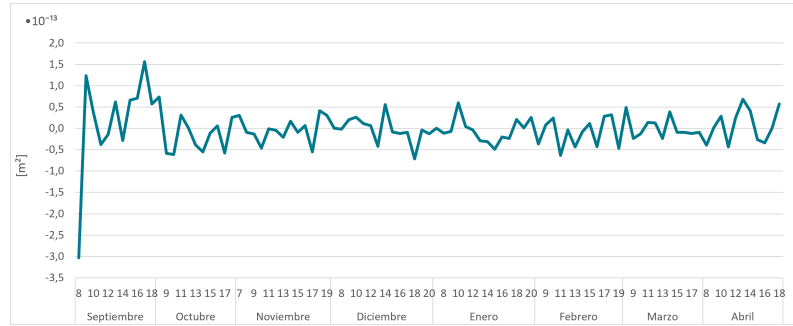


Figura 9.3.1: Variación en área sombreada con 3 [m] de altura con respecto al caso de referencia (3,5 [m]) para el modo Sun Tracking en hora por mes.

En la Figura 9.3.2 se encuentra los resultados para todos los modos al disminuir la altura a 3 [m].

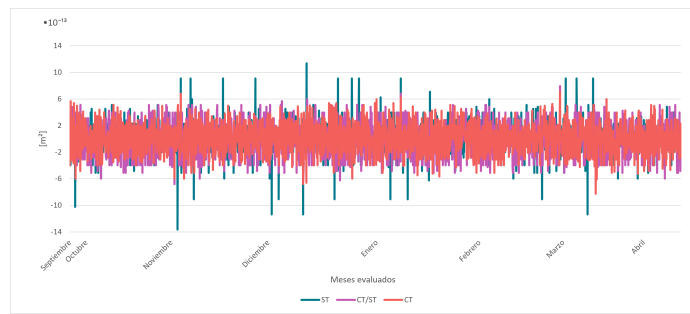


Figura 9.3.2: Variación en área sombreada con 3 [m] de altura con respecto al caso de 3,5 [m], para todas las horas y días evaluados de cada mes según los modos de configuraciones.

Se puede apreciar que Sun Tracking se diferencia más en ciertas ocasiones. Al aumentar a 4 [m] Control Tracking también tiene este comportamiento y al aumentar a 4,5 [m] este modo es el que presenta valores más lejanos de la media.

En la Tabla 9.3.1 se presenta las variaciones en sombra para cada altura evaluada.

Tabla 9.3.1: Variación promedio de sombra para todo el periodo evaluado según modo de configuración, en el caso de variación de altura de la plataforma.

Variación de sombra en [m ²]			
Modo	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	$-5,1 \cdot 10^{-15}$	$-1 \cdot 10^{-14}$	$-1,3 \cdot 10^{-14}$
CT/ST	$-6,9 \cdot 10^{-15}$	$-2,4 \cdot 10^{-15}$	$-3,9 \cdot 10^{-16}$
CT	$-1,0 \cdot 10^{-14}$	$-4,7 \cdot 10^{-15}$	$-5,2 \cdot 10^{-15}$

Contrariamente a la tendencia esperada, tanto al disminuir o aumentar la altura se disminuye levemente (siendo despreciable) la superficie del área formada por la sombra de los paneles. No se pueden realizar más deducciones, debido a la variabilidad en el comportamiento.

9.3.2. Radiación

Como bien se ha dicho, la radiación es el parámetro con mayor impacto. Pero se debe considerar que al cambiar la altura, se puede afectar de mayor forma a los otros parámetros del microclima. Por lo que se recomienda analizar la humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura del aire y suelo; si se quiere y/o necesita obtener resultados más certeros.

El primer análisis es sobre el factor de visión. Al disminuir la altura de 3,5 a 3 [m] se nota un aumento en este factor, para todos los modos, pero con mayor impacto en Sun Tracking, sobretodo luego del mediodía solar, pero para Control Tracking es antes de esta hora.

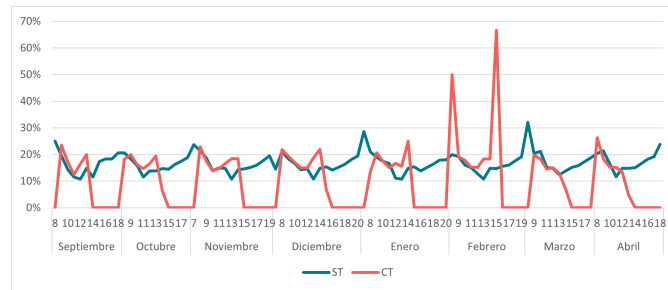


Figura 9.3.3: Porcentaje que muestra el aumento en el factor de visión al disminuir la altura a 3 [m], para cada modo de configuración.

De la Figura 9.3.3 se nota un comportamiento aproximadamente uniforme en los diferentes meses, excepto en ciertas horas cercanas a los extremos de febrero (para Sun Tracking).

Por el contrario, al aumentar la altura de la plataforma ocurren dos cosas interesantes. Primero, que no se ve una diferencia importante en la tendencia en los resultados, entre 4 y 4,5 [m]. Lo segundo, es que en este caso ya no es solo febrero el que resalta en ciertas horas, como se puede ver en la Figura 9.3.4.

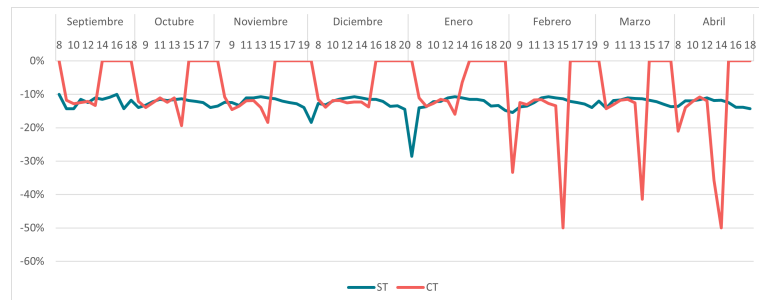


Figura 9.3.4: Porcentaje que muestra la disminución en el factor de visión al aumentar la altura a 4 [m], para cada modo de configuración.

De esta manera, si se aumenta o reduce el factor de visión, la radiación de onda larga y

así la radiación neta al suelo sombreado también siguen esta tendencia. En las Tablas 9.3.2 y 9.3.3 se puede ver la variación de esta última en valor y porcentaje, para cada altura simulada.

Tabla 9.3.2: Variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para R_n en el espacio sombreado para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.

Modo	Variación de R_n en sombra en [W/m^2]		
	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	+2,77	-2,18	-3,91
CT/ST	+2,54	-2,03	-3,63
CT	+0,92	-0,71	-1,27

Tabla 9.3.3: Porcentaje de variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para R_n en el espacio sombreado de para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.

Modo	Porcentaje de variación de R_n en sombra en [%]		
	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	+17,6 %	-6,2 %	-10 %
CT/ST	+15,2 %	-5,1 %	-8,5 %
CT	+1,8 %	-1,3 %	-2,3 %

Así, al reducir la altura se aumenta la radiación en el espacio sombreado y al aumentar, ocurre lo contrario.

El mayor impacto es hacia la reducción de la altura (tanto en porcentaje, con respecto al resultado para el mismo modo pero con altura igual a 3,5 [m], como en valor en W/m^2). Si se analiza la Tabla 9.3.3, se puede notar cómo existe un mayor efecto sobre la reducción en medio metro que el aumento en el doble de esa medida, para los modos Sun Tracking y el de equilibrio CT/ST.

El otro análisis interesante, es que la variación al aumentar la altura va disminuyendo. Por ejemplo, en el caso de Sun Tracking, al aumentar de 3,5 a 4 [m] la variación es de -2,18 [W/m^2] y de 4 a 4,5 [m] (aumentando nuevamente 0,5 [m]) es -1,73 [W/m^2].

El modo Control Tracking es el que se encuentra más cercano en variación para todas las alturas evaluadas, pudiéndose considerar casi despreciable este rango de variación en función del impacto en ciertos tipos de cultivos.

Por otro lado podría ser importante, teniendo en mente que el valor en radiación neta por hora se relaciona con la cantidad de luz que le llega al cultivo (parámetro esencial para la

fotosíntesis), mostrar este comportamiento horario. Para todas las variaciones en altura, este comportamiento no cambia con respecto al ya presentado en el diseño de referencia solo varía en una escala pequeña (por hora), como se ejemplifica en la Figura 9.3.5 con la reducción a 3 [m].

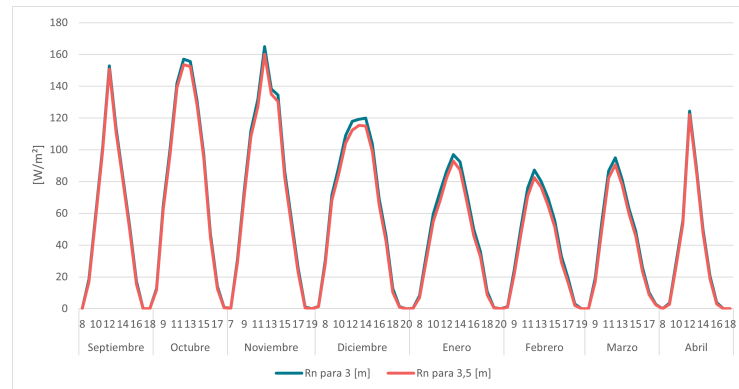


Figura 9.3.5: Comparación de R_n para resultados entre 3 y 3,5[m] para Sun Tracking.

De esta se aprecia una mayor variación, en los meses de mayor radiación solar directa.

Es necesario dar cuenta que los resultados discutidos están en un paso de tiempo horario, por lo que al considerar lo que sucede en la variación en un día o mes, este resultado aumenta su valor y su relevancia.

En definitiva si se busca aumentar o reducir la radiación en la zona sombreada en función de las necesidades del cultivo, parece ser una buena idea analizar este parámetro más allá de simplemente escoger este valor en función de las necesidades por la altura que ocupa el producto agrícola o la maquinaria.

Finalmente, para visualizar el impacto en todo el terreno de ensayo se presenta la Figura 9.3.6 y la Tabla 9.3.4.

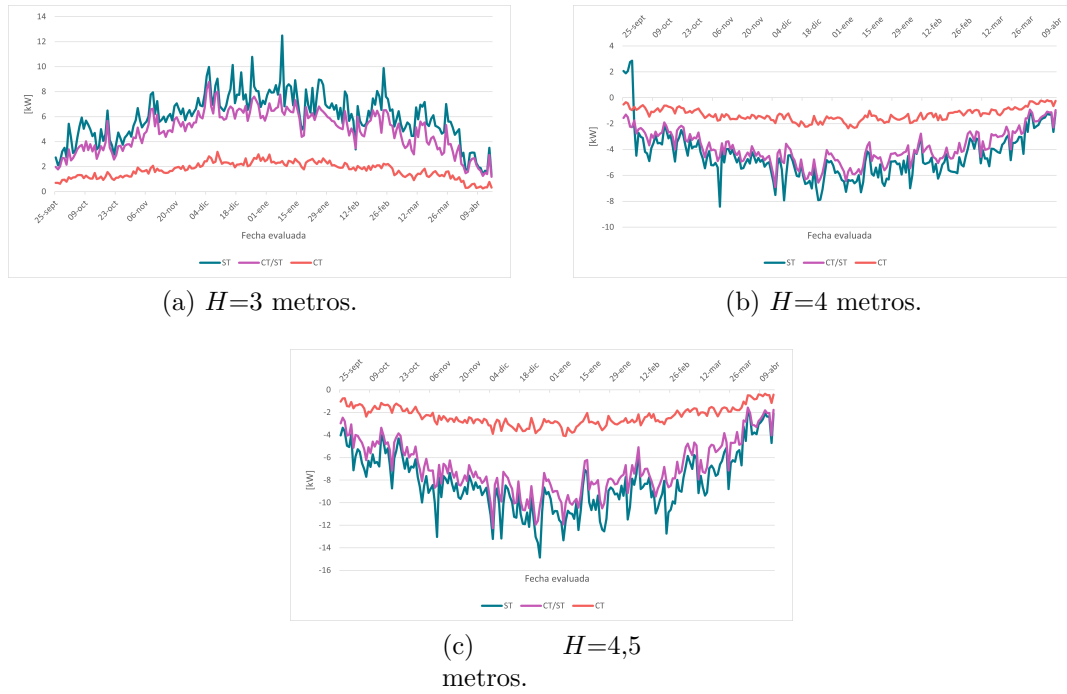


Figura 9.3.6: Aumento o reducción en el calor recibido por el suelo de todo el terreno de ensayo para todos los modos de configuración y para todas las variaciones en altura.

Tabla 9.3.4: Variación horaria promedio en todo el periodo de evaluación, para Q_{total} en todo el terreno para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.

Variación de Q_{total} en sombra en [W]			
Modo	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	+495,5	-379,6	-677
CT/ST	+401	-316,6	-566,7
CT	+141,2	-107,3	-191,7

Al igual que la mayoría de resultados de esta investigación, aquí nuevamente se muestra un mayor impacto en los meses entre noviembre y febrero, sobretodo para el modo Sun Tracking.

En la Tabla 9.3.4 se ve la misma tendencia que la Tabla 9.3.2, pero con una menor influencia al considerar todo lo que ocurre en el terreno de ensayo (menor porcentaje en la variación).

Debido a todo lo mencionado anteriormente, para todas las variaciones, el modo que muestra un mayor impacto en calor es Sun Tracking (llegando, en general, a valores entre 6 y 10 [kW] entre Diciembre y Febrero), siguiéndole de forma bastante cercana CT/ST y mucho más atrás Control Tracking. Este último tiene un comportamiento más uniforme en los meses y no sobrepasa los 3,5 [kW].

Analizando estos resultados para el diseño propuesto (modo de equilibrio CT/ST) se puede concluir que, si se conoce los requerimientos en luz para el cultivo y así se pudiera conocer rangos de radiación incidente al suelo en la cual se desarrollen en óptimas condiciones los cerezos, se podría analizar si merita analizar la reducción de la plataforma con tal de obtener $2,54 [W/m^2]$ más en la zona sombreada por hora. Es importante destacar que estos resultados están con respecto al suelo, por lo que en la realidad existiría una distribución de radiación a lo largo de la altura del cerezo en donde el mayor impacto sería sobre los frutos más cercanos a los paneles.

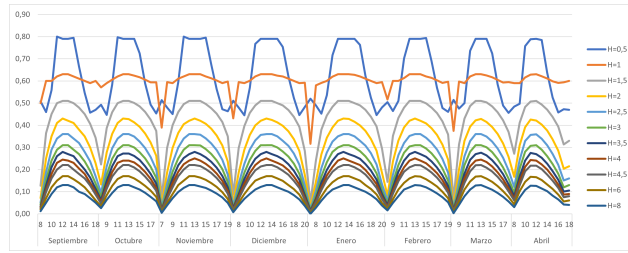
Sin embargo, pareciera que tener una altura menor en cuanto a costos y beneficios sobre el cultivo, podría traer efectos positivos.

Ahora, considerando que si se tiene un proyecto agrivoltaico en donde se ha escogido priorizar la rentabilidad en electricidad generada, pero se quiere equilibrar los impactos sobre el cultivo; se recomienda considerar la reducción en la altura de la plataforma como medida para impactar de menor forma sobre el producto agrícola.

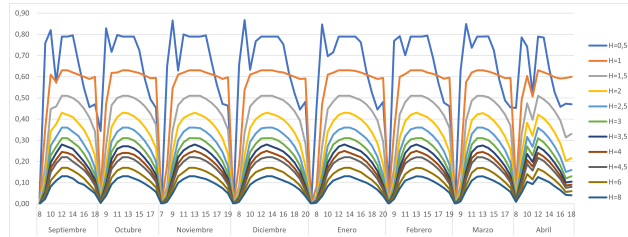
Por otro lado, si el modo escogido es Control Tracking, no pareciera ser recomendable analizar este parámetro, a menos que se encuentre razones económicas sobre la plataforma.

Ahora bien, si se está evaluando un proyecto agrivoltaico en una zona con radiaciones muy altas, se recomienda analizar la altura de la plataforma antes de construirlo, ya que aquí se muestra que el impacto generado podría ser importante. Además, se podría simplificar el cálculo al solo considerar el mes de mayor radiación directa, debido a que aquí se demuestra que es en estos meses donde ocurre el mayor impacto o variación.

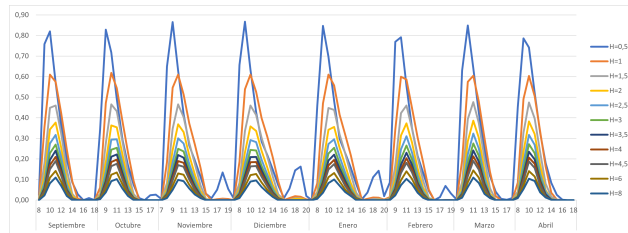
También se puede mencionar, que como aquí existe una restricción importante en altura, debido a la que tiene el cerezo, no se evalúan los resultados para alturas mucho más cercanas al suelo; pero estos resultados mostrados indican que las reducciones a menores metros de altura podrían tener un impacto mucho más fuerte sobre el cultivo (y se debe considerar que de las investigaciones es en estos casos donde se presenta una mayor variación en el microclima). Es por esto, que para el caso, por ejemplo, de lechugas o frutos que no tienen restricciones importantes sobre la altura de plataformas, se generarían mayores valores en la variación de radiación neta. En la Figura 9.3.7 se puede observar cómo el factor de visión empieza a generar una tendencia clara recién a los 1,5 metros hacia arriba, para todos los modos de configuración.



(a) Sun Tracking.



(b) CT/ST.



(c) Control Tracking.

Figura 9.3.7: Factor de visión en alturas entre 0,5 y 8 metros para cada modo de configuración.

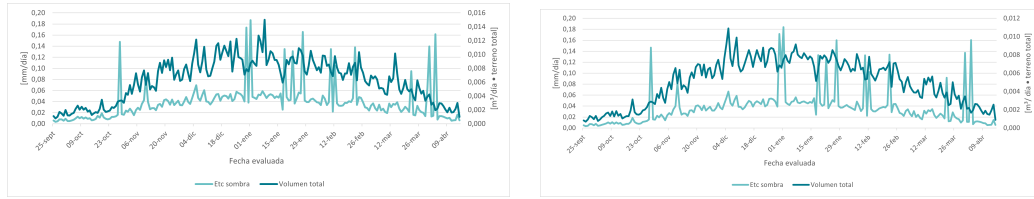
Si se trabaja con este tipo de estudio, y la altura de la plataforma se encuentra bajo los 1,5 metros, se recomienda fuertemente estudiar el presente parámetro.

9.3.3. Potencia generada

Si se revisa la Sección 6.3 se puede notar que este cálculo no depende de la altura de la plataforma, por lo que no se obtiene ninguna variación en este modelo.

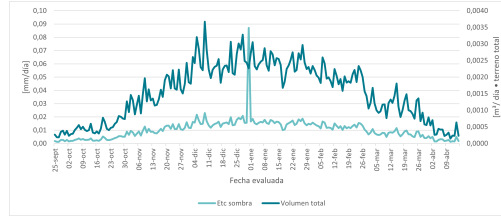
9.3.4. Evapotranspiración

Para mostrar el impacto en la disminución de la altura sobre el modelo de evapotranspiración se presenta la Figura 9.3.8.



(a) Sun Tracking.

(b) CT/ST.

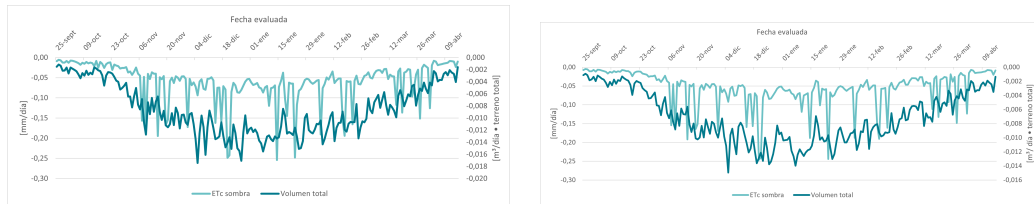


(c) Control Tracking.

Figura 9.3.8: Variación de ET_c en altura y volumen de agua diario al disminuir la altura a 3 [m], según modo.

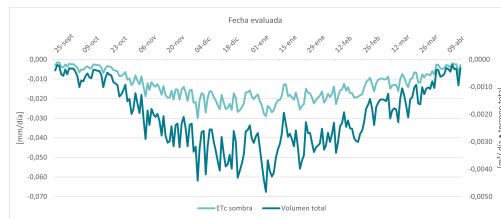
De estas se puede apreciar la tendencia de aumento de pérdida de agua para todos los modos con mayor influencia en los meses de mayor radiación solar directa, lo que se explica por el aumento de radiación neta en el suelo. Así, el modo Sun Tracking tiene mayor impacto en esta variación.

Por otro lado, la Figura 9.3.9 muestra el comportamiento al aumentar a 4,5 [m]. No se presenta el resultado a 4 [m], porque la tendencia es la misma, pero en diferente escala.



(a) Sun Tracking.

(b) CT/ST.



(c) Control Tracking.

Figura 9.3.9: Variación de ET_c en altura y volumen de agua diario al aumentar la altura a 4,5 [m], según modo.

Desde una perspectiva macroscópica, la tendencia es similar a la que presenta la reducción de altura, pero en sentido opuesto.

De esta manera, se llega al resultado final presentado en las Tablas 9.3.5 y 9.3.6. Estas representan la suma de la variación para cada día considerado en la evaluación.

Tabla 9.3.5: Suma de la variación diaria promedio de ET_c en altura de agua, para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.

Modo	Variación de ET_c en la sombra [mm/ periodo de evaluación]		
	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	+7,7	-7,0	-11,9
CT/ST	+7,3	-6,5	-11,0
CT	+2,1	-1,6	-2,8

Tabla 9.3.6: Suma de la variación diaria promedio de ET_c en volumen de agua, para todos los modos con respecto al diseño de referencia, para la variación en la altura de la plataforma.

Modo	Variación de ET_c volumen [m^3 /periodo de evaluación · área total terreno]		
	H=3 [m]	H=4 [m]	H=4,5 [m]
ST	+1,3	-1,0	-1,7
CT/ST	+1,0	-0,8	-1,5
CT	+ 0,3	-0,2	-0,4

Así, al reducir la altura de la plataforma se aumenta la pérdida de agua, y al aumentar la altura ocurre lo contrario.

Como ya el lector podría esperar, el mayor impacto es hacia la reducción de la altura en medio metro. Es decir, con la disminución en 0,5 [m] se pierde un mayor volumen de agua. Pero en este modelo se ve una mayor cercanía en los resultados (comparado con la radiación), tanto en lo que pasa exclusivamente en la zona sombreada como para todo el terreno.

Si el uso eficiente del agua es el objetivo final, este parámetro pareciera no ser parte esencial en el análisis. Incluso, para el modo Control Tracking, la variación llega a ser despreciable.

Tal vez si se aumentara la escala del diseño fotovoltaico (mayor número de filas y paneles), el valor resultado sea más llamativo e importante, esta hipótesis se resolverá más adelante.

Por otro lado, si el objetivo del cambio en la altura de la plataforma es para combatir el clima cálido, 1,5 o 1,7 [m^3] es un bonus con un valor no menor de ahorro en agua. Sobre todo si se considera este tipo de prácticas en muchas plantaciones y si se considera el contexto desabastecimiento de agua que se prevé en el país.

En resumidas cuentas, la altura de la plataforma impacta de forma importante solo al

modelo de radiación, pero dentro del rango en que es posible evaluar los resultados para los cerezos pareciera no existir una variación importante, excepto en los casos donde se busca tener una mayor radiación o lo contrario, se busca combatir los climas extremos. Solo en estas situaciones se recomienda analizar este parámetro antes de su elección. Considerando que esto depende del tipo de cultivo estudiado y de maquinarias que requieran trabajar en la zona.

Finalmente, se nota un aumento más sustancial en el cambio de la altura de la plataforma que en la variación en la hora de cambio de modo a Sun Tracking en el objetivo de diseño de equilibrio.

9.4. Distancia entre filas de paneles

Otra categoría a analizar es la distancia existente entre las filas de paneles.

Antes que todo, se tiene calculado este parámetro para cada hora de cada día de cada mes dentro del rango de evaluación de esta investigación, que no contempla un año completo. Si bien los paneles generaran en todo momento, en la Figura 9.4.1 se nota como existe una tendencia a necesitar mayores distancias en los meses de mayor radiación solar (meses dentro del rango de evaluación de este estudio). Por esta razón no se incluyen en el cálculo los demás meses.

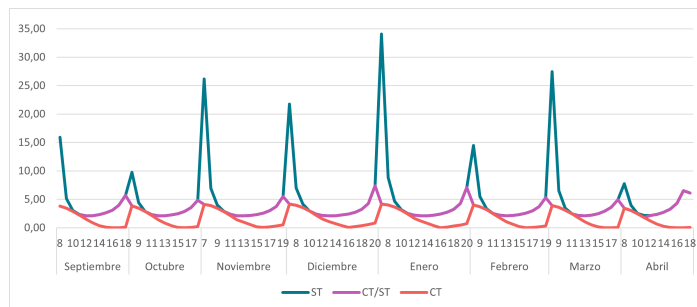


Figura 9.4.1: Distancia mínima entre las filas de paneles, para cada hora en cada mes de evaluación y según modo de configuración.

De esta se nota como, nuevamente, en las horas cercanas al amanecer o atardecer se presenta un comportamiento extraño elevando los resultados de forma considerablemente con respecto a las demás horas. Para el modo Sun Tracking, resalta este comportamiento en la hora de amanecer y para CT/ST en la hora de atardecer.

Es interesante que en el modo Control Tracking, este comportamiento no se presente de forma pronunciada como en los otros.

Por esta razón, se analizará el resultado sin estas horas problemáticas.

Tabla 9.4.1: Distancias mínimas promedios y máximas para las filas de paneles según mes y modo de configuración.

Mes	ST		CT/ST		CT	
	Promedio	Máximos	Promedio	Máximos	Promedio	Máximos
Septiembre	3,2	5,7	2,9	3,9	1,4	3,8
Octubre	3,0	4,8	2,8	3,8	1,4	3,8
Noviembre	3,3	7,0	2,9	4,1	1,6	4,1
Diciembre	3,5	7,4	3,0	4,3	1,6	4,2
Enero	3,7	8,8	3,0	4,2	1,6	4,2
Febrero	3,2	5,5	2,9	4,0	1,5	4,0
Marzo	3,3	6,5	2,9	3,9	1,5	3,9
Abril	3,6	6,5	3,2	6,5	1,2	3,4
Promedio	3,3	6,5	2,9	4,4	1,47	3,93
Máximo	3,7	8,8	3,2	6,5	1,64	4,17

En la Tabla 9.4.1 se presenta el resultado para cada modo en valores promedios (es decir un promedio a partir de los valores horarios representativos de cada mes) y los valores máximos (con el resultado de un día representativo del mes por hora, se obtiene el máximo de todo esos datos).

Se aprecia una gran diferencia en los resultados en promedio y máximos.

Debido a que la distancia está en 6 metros, se analizaran los resultados para 4,2 y 8,8 metros.

En la práctica el resultado debería variar en la potencia generada, sombra y en el microclima, por ende radiación y evapotranspiración. Pero como el modelo de esta investigación no indica el efecto del sombreado sobre la potencia generada por cada panel, no se verá variación. Por otro lado, como bien se comentó en la Sección 6.1.4.1, no se considera el impacto del factor de visión en el espacio entre filas de paneles donde no se genera sombra. Como en la realidad esto sí afecta, se debería notar un cambio. Se comenta que para el peor de los casos (mayor valor en factor de visión), al aumentar la distancia a 8,8 [m] se observa un aumento no menor de 25 % para estas zonas y para la zona sombreada una disminución en 18 %.

Por esta razón, en la incidencia de la variación de la distancia entre filas afecta los resultados en factor de visión.

En cuanto a esta investigación, el único modelo que si presenta variación es la sombra.

9.4.1. Sombra

Antes de mostrar la variación total, en las Figuras 9.4.2 y 9.4.3 se puede ver visualmente cómo cambia la sombra al variar la distancia entre los paneles para los modos de configuración más opuestos, para una hora en específica.

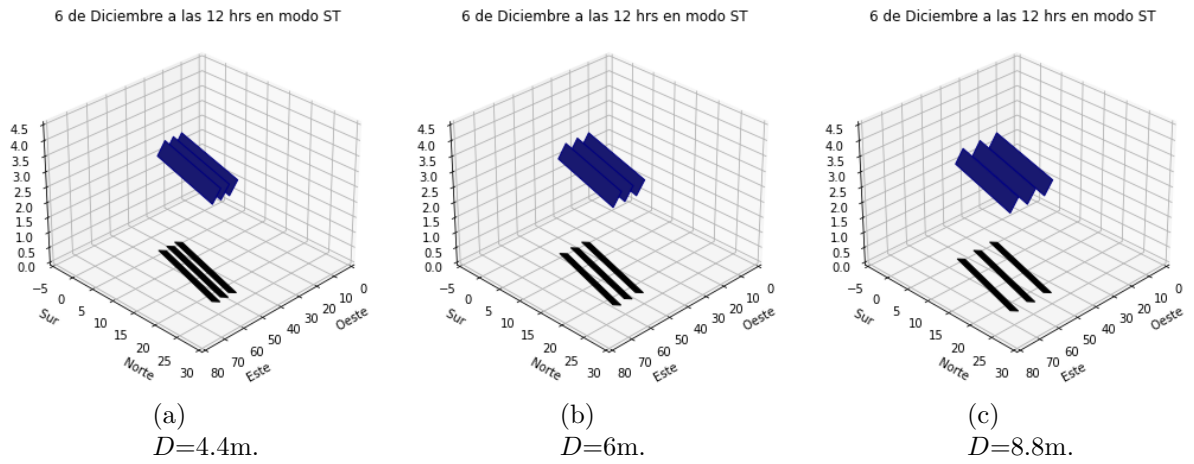


Figura 9.4.2: Sombra generada para distintas distancias entre la filas de paneles para un 6 de Diciembre a las 12 hrs en modo Sun Tracking.

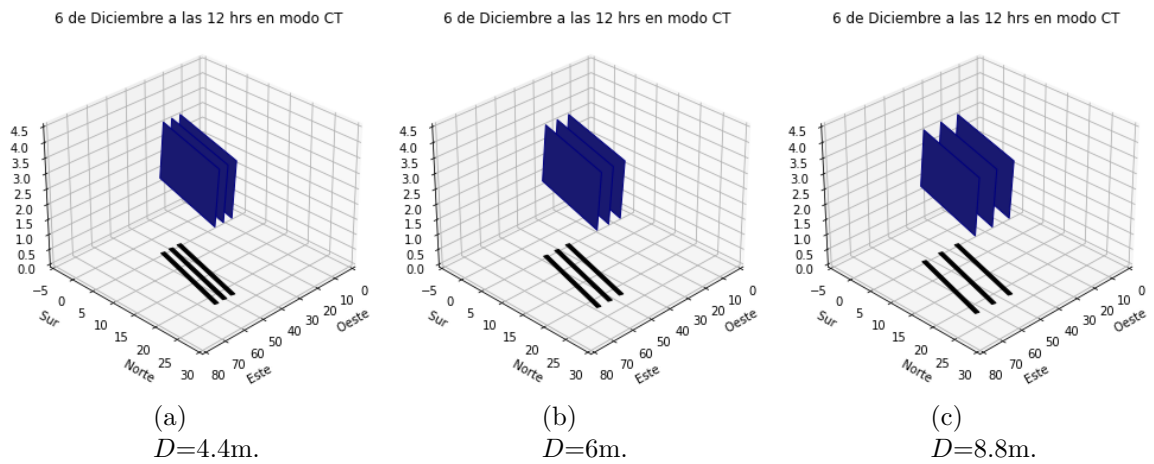


Figura 9.4.3: Sombra generada para distintas distancias entre la filas de paneles para un 6 de Diciembre a las 12 hrs en modo Control Tracking.

El impacto de la variación en la distancia de paneles se puede observar en la Tabla 9.4.2.

Tabla 9.4.2: Variación promedio de sombra para todo el periodo evaluado según modo de configuración, en el caso de variación de distancia entre las filas de paneles.

Variación de sombra en $[m^2]$		
Modo	D=4,4 [m]	D=8,8 [m]
ST	$5,33 \cdot 10^{-16}$	$-1,4 \cdot 10^{-14}$
CT/ST	$-1,6 \cdot 10^{-15}$	$-6 \cdot 10^{-15}$
CT	$-3,18 \cdot 10^{-15}$	$-1,6 \cdot 10^{-14}$

Es interesante como, nuevamente no se ve una tendencia clara al disminuir o aumentar la distancia entre todos los modos de configuración.

De todas formas estos valores son pequeños llegando ser despreciables. Es por esta razón que no se evalúa este impacto en los modelos de calor sobre el suelo y de evapotranspiración.

9.5. Escala del proyecto

Finalmente, el último estudio es sobre la escala o dimensión del diseño fotovoltaico.

Si bien al aumentar el número de paneles por fila o la cantidad de estas últimas, también se debe aumentar la dimensión del terreno; entonces el efecto de este parámetro se verá en los resultados que consideran áreas, es decir, calor y evapotranspiración en todo el terreno junto con la potencia generada.

A continuación, se ve el efecto al triplicar el número de paneles por cada fila y la cantidad de filas ($n_{filas}=9$ y $n_{paneles}=60$).

Al realizar esto se aumenta la dimensión del terreno a 140×80 [m] ($A_{total} = 11.200$ [m^2]) y el punto de origen se cambia a $x_o=60$ e $y_o=10$. La altura y distancia entre paneles se mantuvo. En la Figura 9.5.1 se puede ver el diseño visualmente.

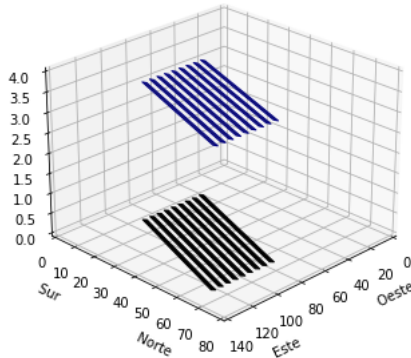


Figura 9.5.1: Diseño para evaluación del impacto de escala, mostrado para un 25 de febrero a las 13 hrs.

De esta forma la sombra aumenta de manera sustancial con respecto al caso de referencia, con promedio diario de 800%. Esto se muestra en la Figura 9.5.2.

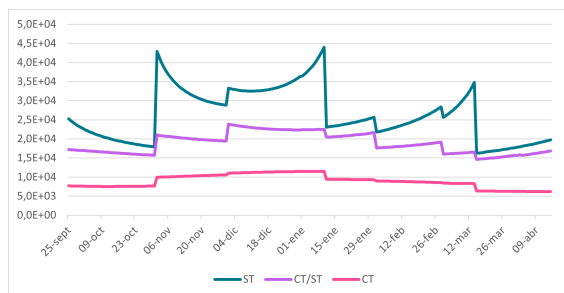


Figura 9.5.2: Aumento de área sombreada con respecto a caso de referencia en variación de escala para el periodo de evaluación.

Como era de esperar la mayor variación la tiene el modo Sun Tracking, generando una importante diferencia con el modo de equilibrio CT/ST.

Este resultado afecta directamente al calor en todo el terreno. Así, el modo Sun Tracking aumenta el calor en el suelo en 270 %, CT/ST en 306 % y Control Tracking 354 %. Debido al gran aumento en área del terreno, se tienen porcentajes muy elevados.

Es necesario recalcar que la radiación incidente al suelo sombreado o al resto, no cambia.

Este resultado causa que la evapotranspiración en volumen aumente, para Sun Tracking en 309 %, para CT/ST en 338 % y Control Tracking 332 %. Implicando una mayor incidencia de este parámetro sobre la pérdida de agua que el calor recibido por el suelo, en los primeros modos nombrados.

Dando como resultado en pérdida de agua lo informado en la Tabla 9.5.1.

Tabla 9.5.1: ET_c en volumen de agua para el terreno según modo de configuración y campo agrícola en variación de escala.

	ST	CT/ST	CT	Agrícola
ET_c [m^3 /periodo de evaluación · área total terreno]	10.747	10.943	11.372	12.153

Al triplicar el proyecto en términos de los parámetros de diseño, la pérdida de agua se vuelve un valor más significativo y aumenta en aproximadamente 4 veces el resultado con el diseño de referencia. Así, el modo Sun Tracking tiene una reducción en la pérdida de agua de 1.405 [m^3], el de equilibrio CT/ST 1.209 [m^3] y Control Tracking 781 [m^3].

Si bien el porcentaje que representa esta reducción sobre lo resultado para el campo agrícola, se duplica al triplicar los diseños de parámetro; el valor de pérdida de agua pareciera ser uno con mayor importancia e incidencia sobre el uso eficiente de este recurso.

Finalmente, en la Tabla 9.5.2 se muestra lo resultado para la capacidad instalada por cada modo de configuración.

Tabla 9.5.2: Generación por los paneles en el periodo de evaluación según el modo de configuración para la variación en la escala del proyecto.

	ST	CT/ST	CT
Generación en un año [MWh]	486,7	424,5	237,6

Para este modelo, los valores también muestran un aumento considerable para todos los modos de configuración, siguiendo la misma tendencia entre ellos.

Este aspecto fue mostrado para evidenciar cómo cambia la magnitud en los resultados a aumentar la escala en este tipo de proyectos.

Uno de los proyectos agrivoltaicos más grande en el mundo se encuentra en Estados Unidos y cuenta con 3.276 paneles (ver Figura 9.5.3). El diseño aquí evaluado representa apenas un 2% de esta planta en Estados Unidos.



Figura 9.5.3: Proyecto agrivoltaico Jack's Solar Garden, Colorado [10].

Se está aumentando el interés y la construcción por este tipo de proyectos, por lo que será de importancia evaluar el impacto a diferentes escalas.

Capítulo 10

Conclusiones

En el presente documento se aborda el concepto de sistemas agrivoltaicos, los cuales por un lado abordan problemáticas ocasionadas por los efectos derivados del cambio climático enfocado en el nexa: agua, energía y alimento; y por otro lado prevén una solución al posible conflicto que se podría generar por el uso de la tierra, entre la energía solar fotovoltaica y la agricultura en Chile.

En esta investigación se propuso realizar un estudio que fuese capaz de cuantificar el impacto que tiene la instalación de los paneles fotovoltaicos sobre un campo agrícola con cerezos cultivados; en términos de la sombra generada, radiación incidente al suelo, potencia generada por estos dispositivos y pérdida de agua mediante el proceso de evapotranspiración.

Construyendo así un estudio basado en 20 papers o investigaciones y un libro, con cada método de cálculo escogido con minuciosidad para lograr que los resultados sean los más cercanos a lo que ocurre en la realidad, para la localidad estudiada.

En consecuencia, el modelo de la sombra logra obtener valores altos en su validación al compararlo con el programa Revit, con un 1,8% de diferencia al contrastarlo con un panel en tres dimensiones. Los desafíos para este modelo están ligados a las sombras que se intersectan en ciertas horas, pero estas representan un bajo valor de 2,7% con respecto a todas las horas evaluadas.

En cuanto a la radiación, se encuentra que este es el único componente del microclima que representa un cambio sustancial en un proyecto similar al abordado aquí (proyecto fundación Fraunhofer Chile) lo que valida el estudio basado solo en el cambio de este parámetro.

Por otro lado, en cuanto al modelo de radiación para un suelo sin sombra, se basa en un estudio en una localidad cercana a la abordada en este documento (a 24 km) y esta presenta un bajo porcentaje de error del 3%. De donde los valores tomados para la emisividad atmosférica y el albedo del suelo, son los responsables en la cercanía o lejanía con lo obtenido en la práctica. Para el caso de un suelo sombreado, no se encontró un estudio que aborde esta temática enfocado en esta superficie considerando tanto la transferencia radiativa de onda corta como la larga, por lo que no fue posible realizar una comparación para su validación. Los desafíos en este modelo se relacionan con el uso del factor de visión. Si bien no representan un valor sustancial sobre los resultados considerados en esta investigación, si se quiere

evaluar el impacto que tiene la variación en los parámetros de diseño, como la distancia entre las filas de paneles, todo pareciera indicar que se debe considerar el cálculo tanto hacia la zona sombreada (considerando el efecto de todas las filas de paneles hacia cada una de las sombras) como a la zona entre sombras.

Finalmente, para el modelo de evapotranspiración se encuentra una diferencia de 29 % con respecto a los valores para la pérdida de agua, los cuales dependen solo de factores climáticos, dados por una estación de San Clemente de la Red Agrometeorológica de INIA. Esto causado por la suposición hecha de comportamiento igual para todos los días de un mes en ciertos factores climáticos debido a la limitación en los datos del Explorador Solar, indicando así la importancia de considerar la variabilidad de los factores climáticos no solo por hora y mes, sino que también según el día.

Por otro lado, se observa que este modelo queda determinado principalmente por la radiación incidente y las necesidades del cultivo dadas por el factor k_c , quitándole relevancia a los demás componentes del microclima y así, nuevamente, validando la decisión de no considerar la variación en otros componentes del microclima causada por los paneles.

En cuanto a la comparación para todos los modelos con las dimensiones del diseño de referencia, entre una zona del suelo sombreada y otra que no, se puede nombrar como resultados principales a los que siguen: 1) La radiación de onda corta entrante a un suelo sombreado se reduce en promedio un 75 % en comparación con uno no sombreado. 2) La radiación de onda larga en un suelo sombreado tiene una mayor relevancia influyendo en un tercio sobre el resultado (33 %), en cambio para un suelo no sombreado este representa un 15 %. 3) En resumen, se genera una reducción de 86 % en la radiación neta para un suelo sombreado. 4) Si bien hay un impacto considerable en las zonas sombreadas, al comparar el calor recibido en todo el terreno por un proyecto agrivoltaico versus un campo agrícola, se tiene una reducción de 5,9 %. 5) El modo de equilibrio CT/ST tiene una generación por los paneles de 47,2 [MWh]. 6) La instalación de paneles fotovoltaicos en un campo agrícola cambia las fechas en que ocurren los máximos de pérdida de agua mediante evapotranspiración. Causando así una reducción en la zona sombreada de 76 %. 7) La instalación de paneles afecta de mayor forma a la radiación incidente al suelo sombreado que a la pérdida de agua en esa zona. 8) Al considerar todo el terreno de ensayo, el efecto disminuye sustancialmente y para todo el periodo de evaluación se obtiene una reducción, con respecto al campo agrícola, de 134 [m^3] de agua. Implicando un mejor uso de este recurso y así un requerimiento menor en riego, aunque no a gran escala. 9) Los demás componentes del microclima (aparte de la radiación) tienen una mayor influencia en los resultados para un suelo sombreado que a uno no sombreado, aunque sigue estando en una pequeña escala (despreciable). 10) El mayor impacto de los paneles en todos los resultados presentados es en meses entre noviembre y febrero.

Por otra parte, se planteó el objetivo de analizar el impacto de los parámetros de diseño. En cuanto a los objetivos de diseño se recomienda fuertemente utilizar o diseñar para un modo de equilibrio entre la producción agrícola y la generación de electricidad, debido a la gran cercanía de los resultados, para la presente investigación, del modo de equilibrio (CT/ST) con el modo de mayor generación eléctrica (Sun Tracking).

Al fijar en una hora más (para la mayoría de los meses) en modo Control Tracking para el

modo de equilibrio CT/ST, se genera una variación mínima en beneficio al cultivo (radiación) y un efecto importante en la generación de electricidad (reducción en 1 [MWh]). Por otro lado, al fijarlo en dos horas más (para la mayoría de los meses), se causa un efecto considerable, el cual amerita un análisis del impacto sobre el desarrollo del cultivo y un análisis económico que permita clarificar la rentabilidad del proyecto para este caso.

En la variación de la altura de la plataforma se concluye que: se aumenta la radiación al disminuir la altura y se disminuye la radiación en caso contrario; mayor impacto hacia la reducción de medio metro en la radiación incidente al suelo (para los modos Sun Tracking y CT/ST); a medida que se va aumentando la altura, el efecto sobre la variación en radiación va perdiendo peso; los resultados en pérdida de agua no son significantes; se recomienda fuertemente estudiar este parámetro si se busca mitigar o aumentar la reducción de radiación que ocasionan los paneles, especialmente para cultivos que no tienen requerimientos importantes en la altura de la plataforma (menores a 1,5 [m]).

Con respecto a la distancia entre filas, no fue posible realizar un análisis detallado debido a la limitación en el uso del factor de visión. Para esta variación se recomienda involucrar en el cálculo los efectos dejados fuera de esta investigación, ya que para el peor de los casos con 8,8 [m] (mayor valor en factor de visión) se notó un aumento de 25 % en las zonas entre sombras y para las sombreadas una disminución en 18 %. El único efecto estudiado que se puede informar, es una variación despreciable en la sombra.

Finalmente, al aumentar la escala de un proyecto agrivoltaico, todos estos resultados comentados adquieren una mayor relevancia por el aumento en valor de pérdida de agua y generación de paneles. Al triplicar la escala (número de paneles y cantidad de ellos) se cuadruplica el valor en pérdida de agua para todo el terreno en el periodo de evaluación según el modo de configuración y se duplica su representación con respecto a lo sucedido en el campo agrícola.

Esto señala la importancia de estudiar estos proyectos, especialmente como medida para abordar los desafíos de la transición energética.

Capítulo 11

Recomendaciones para investigaciones futuras

En el último capítulo de esta investigación se comenta con más detalle las oportunidades de mejora de los modelos desarrollados aquí.

11.1. Datos climáticos

El aspecto que más se comentó y demostró a lo largo de este documento es la importancia de considerar en los diversos factores la variabilidad horaria, diaria y mensual. Esto apunta a todos los factores climáticos, pero en este documento faltó considerar la variabilidad por mes en radiaciones y nubosidad.

Por otro lado, se desconoce el impacto que podría tener considerar la variabilidad horaria del albedo y emisividades. De todos modos, al contar con mediciones en el lugar exacto de estos factores, se obtendrían valores más precisos y así se da la posibilidad de tomar decisiones con menos incertidumbre.

Finalmente, como se muestra en esta investigación, podría ser importante considerar la medición en terreno del microclima en condiciones de sombra, tanto de los factores climáticos como las emisividades y albedo. Y sobretodo de estos últimos nombrados, porque como se mostró, estos valores impactan de manera importante a la radiación incidente al suelo y para los proyectos agrivoltaicos estas radiaciones disminuyen sustancialmente generando una mayor influencia en factores como estos.

11.2. Tipo de tecnología fotovoltaica

Existen varias investigaciones, sobre este tipo de proyecto, que están evaluando el impacto que tiene el uso de tecnologías fotovoltaicas no usuales. Como los paneles con espacios transparentes entre las celdas, como método para combatir la gran reducción de radiación en las zonas bajo estos dispositivos, el uso de paneles bifaciales para recolectar la radiación horizontal que es reflejada por el suelo.

Para desarrollar proyectos en la práctica se requiere de estudios teóricos que involucren a todas estas posibilidades.

11.3. Modelos

Finalmente, en cuanto a los modelos desarrollados se recomienda añadir un método que sea capaz de percatar las ocasiones en que se producen intersecciones entre las sombras de las filas de paneles y se cuantifique la superficie que abarca esa sombra.

Asimismo, agregar la sombra que genera la plataforma sobre el suelo aumentaría la cercanía de los resultados con la realidad.

Por otro lado, a pesar de tener bajos porcentajes de diferencia, se podría incluir un método de cálculo de sombra que contemple objetos en tres dimensiones.

En cuanto a la radiación, se recomienda fuertemente trabajar en el desarrollo de un buen método para el cálculo del factor de visión. Esto es, agregar la influencia del factor de visión entre las filas de paneles y las sombras generadas por las otras filas, y considerar la influencia de los paneles en las zonas entre sombras.

En último lugar, para el proceso de evapotranspiración, se recomienda realizar las mediciones necesarias para utilizar los modelos de este proceso que requieren de esta información para obtener resultados más certeros.

No estaría demás realizar directamente mediciones de pérdida de agua para compararlos y ver el rendimiento de estos modelos.

Además, en esta investigación se intentó dilucidar el impacto en el ahorro de agua al compararlo con la cantidad que actualmente se utiliza en las zonas para el riego. Pero se encontraron dos grandes problemas, en primer lugar, estos resultados tienen una sobre dimensión debido a que no se considera la variabilidad diaria en los factores climáticos (lo que causó que se tuvieran valores más altos en pérdida de agua que lo encontrado en riego); y en segundo lugar, los únicos datos que se pudieron encontrar estaban basados en el proceso de evapotranspiración o eran recomendaciones para zonas lejanas a la localidad de este estudio. Se recomienda entrar en detalle sobre el impacto del ahorro debido a pérdida de agua por evapotranspiración sobre el agua utilizada para riego.

Finalmente, se recomienda fuertemente agregar algún cálculo económico para considerar la rentabilidad del proyecto y un estudio o mediciones experimentales de la producción o desarrollo del producto agrícola.

Bibliografía

- [1] D. Jung, y A. Salmon. Agrivoltaico: Protección de cultivos, agua y clima con paneles fotovoltaico. fraunhofer. <https://www.fraunhofer.cl/content/dam/chile/es/documentos/csetdocument/papers/FCR%20CSET%20-%20Whitepaper%20Agrivoltaico.pdf> (acceso: 5 de Noviembre de 2022).
- [2] Ministerio del Medio Ambiente. Principales resultados. <https://snichile.mma.gob.cl/resultados-principales/> (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [3] BCN. Carbono neutralidad en el sector energético de Chile. obtiearchivo.bcn. https://obtiearchivo.bcn.cl/obtiearchivo?id=repositorio/10221/32578/1/BCN_Carbononeutralidad_en_el_sector_energetico_Chile_15Oct._Rev._RT01_edPM.pdf (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [4] Ministerio de Energía. Planificación Energética de Largo Plazo. energia.gob. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/20191209_actualizacion_pelp_-_iaa_2019.pdf (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [5] Ferrer, M. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2. <https://www.cr2.cl/cambio-climatico-como-afecta-a-nuestro-pais-y-como-nos-podemos-preparar-noticias-u-de-chile/> (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [6] Servicios climáticos. climatologia.meteochile. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoCambioClimatico> (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [7] Agua. ODEPA <https://www.odepa.gob.cl/sustentabilidad/agricultura-sustentable/agua#:~:text=En%20Chile%2C%20como%20es%20una,a%3%B1o%20agr%C3%ADcola%202020%20%E2%80%93%202021> (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [8] R. Alvarado. "El 80 % de los problemas de agua en Chile se resolverían con una buena gestión". Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. <https://forestal.uchile.cl/noticias/146035/el-80-de-los-problemas-de-agua-se-resolverian-con-una-buena-gestion> (acceso: 11 de Diciembre de 2022).
- [9] S. Hartley. Harvesting the sun twice: Enhancing livelihoods in East African agricultural communities through innovations in solar energy. isep. https://www.isep.or.jp/en/wp-content/uploads/2021/04/ISEP_webinar_slides_Randle-Boggis.pdf (acceso: 5 de Noviembre de 2022).
- [10] Agritecture. Largest Farm to grow crops under solar panels proves to be a bumper crop for agrivoltaic land use. agritecture. <https://www.agritecture.com/blog/2022/2/3/largest-farm-to-grow-crops-under-solar-panels-proves-to-be-a-bumper-crop-for-agrivoltaic-land-use> (acceso: 10 de Diciembre de 2022).
- [11] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele, y P. Högy, "Agropho-

- tovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review”, *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 39, n° 4. Springer Science and Business Media LLC, jun. 19, 2019. doi: [10.1007/s13593-019-0581-3](https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3).
- [12] Molina, P.S. El primer proyecto de agrofotovoltaica en américa latina está en Chile. *pv magazine Latin America*. <https://www.pv-magazine-latam.com/2017/11/30/el-primer-proyecto-de-agrofotovoltaica-en-america-latina-esta-en-chile/> (acceso: 5 de Noviembre de 2022).
- [13] Peoplesdaily. PV Park in NW China’s Qinghai contributes to sustainable development, *Alwihda Info - Actualités TCHAD, Afrique, International*. https://www.alwihdainfo.com/PV-park-in-NW-China-s-Qinghai-contributes-to-sustainable-development_a115074.html (acceso: 12 de Diciembre de 2022).
- [14] H. A. AL-agele, K. Proctor, G. Murthy, y C. Higgins, A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems, *Sustainability*, vol. 13, n° 5. MDPI AG, p. 2850, mar. 06, 2021. doi: [10.3390/su13052850](https://doi.org/10.3390/su13052850).
- [15] M. A. Zainol Abidin, M. N. Mahyuddin, y M. A. A. Mohd Zainuri, “Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review”, *Sustainability*, vol. 13, n° 14. MDPI AG, p. 7846, jul. 14, 2021. doi: [10.3390/su13147846](https://doi.org/10.3390/su13147846).
- [16] E. Hassanpour Adeh, J. S. Selker, y C. W. Higgins, “Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency”, *PLOS ONE*, vol. 13, n° 11. Public Library of Science (PLoS), p. e0203256, nov. 01, 2018. doi: [10.1371/journal.pone.0203256](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256).
- [17] Acosta, M.B. (2021). Partes del Estoma - ¡Resumen con esquemas!. *ecologiaverde*. <https://www.ecologiaverde.com/partes-del-estoma-3208.html>(acceso: 4 de Noviembre de 2022).
- [18] Chasco , J.P. (2022) Propuesta de un sistema agrivoltaico en frutales para el contexto chileno. Tesis de pregrado.
- [19] Allen, R.G. (2006) *Evapotranspiracion del Cultivo: Guias para la determinacion de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>.
- [20] C. Toledo y A. Scognamiglio, “Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)”, *Sustainability*, vol. 13, n° 12. MDPI AG, p. 6871, jun. 17, 2021. doi:[10.3390/su13126871](https://doi.org/10.3390/su13126871).
- [21] GoogleEarth. Google. <https://earth.google.com/> (acceso: 17 de Agosto de 2022).
- [22] Cerezo. Necesidades de Clima y suelo para su cultivo (2021) ViLab. <https://www.vilab.cl/cultivos/cerezos/cerezo/#:~:text=El%20cerezo%20requiere%20entre%20700,yema%20hinchada%20hasta%20la%20cosecha> (acceso: 5 de Junio de 2022).
- [23] Bastias, I.A. (2020) CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA, REPRODUCTIVA Y DE CALIDAD DE FRUTA DE DISTINTAS VARIEDADES DE CEREZO (*PRUNUS AVIUM* L.) EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE. Tesis de magíster. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/48228>.
- [24] L, W. (2022). How much sun do fruit trees need?, *Nature Hills Nursery*. Nature Hills Nursery. <https://www.naturehills.com/blog/post/how-much-sun-do-fruit-trees-need>

- (acceso: 26 de Agosto de 2022).
- [25] Cherries. Almanac. <https://www.almanac.com/plant/cherries#:~:text=Plant%20cherry%20trees%20in%20a,a%20pH%20of%206.0%2D7.0> (acceso: 26 de Agosto de 2022).
- [26] Y. Vitasse et al., “Impact of microclimatic conditions and resource availability on spring and autumn phenology of temperate tree seedlings”, *New Phytologist*, vol. 232, n° 2. Wiley, pp. 537–550, ago. 16, 2021. doi: [10.1111/nph.17606](https://doi.org/10.1111/nph.17606).
- [27] Explorador Solar. <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- [28] Swiss geoportal. geo.admin.ch. <https://map.geo.admin.ch/?layers=ch.meteoschweiz.messwerte-globalstrahlung-10min&lang=de&topic=e&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe> (acceso: 2 de Diciembre de 2022).
- [29] Catálogo de Soluciones tecnológicas para mejorar la eficiencia hídrica y las técnicas de riego intraprediales en la Región de O’Higgins. Opia.CL: Observatorio para la Innovación Agraria, Agroalimentaria y Forestal. <https://opia.fia.cl/601/w3-article-119485.html> (acceso: 4 de Noviembre de 2022).
- [30] Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile. (2013). Tesis de pregrado. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148777/Z%c3%ba%c3%bliga-%20Consumo%20de%20agua%20%282013%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [31] Arevalo, A.M. (2020) FENOLOGÍA Y FISIOLOGÍA DE UN HUERTO DE CEREZO (PRUNUS AVIUM L). CV. SANTINA, PRODUCIDO BAJO MACROTÚNEL Y TEPALO ANTILLUVIA. Tesis de pregrado. <http://dspace.otalca.cl/bitstream/1950/12154/3/2020A000018.pdf>.
- [32] J.A. Yuri, et al. (2021). Cerezo: Influencia del Volumen de Raíces y Tipo de Planta en su crecimiento Y Productividad, *Mundoagro*. <https://mundoagro.cl/cerezo-influencia-del-volumen-de-raices-y-tipo-de-planta-en-su-crecimiento-y-productividad/> (acceso: 27 de Noviembre de 2022).
- [33] G. Bujdosó y K. Hrotkó, “Cherry production.”, *Cherries: botany, production and uses*. CABI, pp. 1–13, 2017. doi: [10.1079/9781780648378.0001](https://doi.org/10.1079/9781780648378.0001).
- [34] Regina Cherry Tree. Mr Middleton Garden Shop. <https://www.mrmiddleton.com/regina-cherry-tree/> (acceso: 27 de Noviembre de 2022).
- [35] Prunus avium 'regina' Cherry sweet cherry care plant varieties. shoot. <https://www.shootgardening.co.uk/plant/prunus-avium-regina> (acceso: 27 de Noviembre de 2022).
- [36] M. Tajima y T. Iida, “Evolution of agrivoltaic farms in Japan”, *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2021. doi: [10.1063/5.0054674](https://doi.org/10.1063/5.0054674).
- [37] Neves, L. et al. (2022). Photovoltaic markets and Technology, *pv magazine International*. <https://www.pv-magazine.com/2020/03/31/a-good-year-for-solar-agrivoltaics-in-vineyards/%20las%20plantaciones%20nacionales%20de%20cerezos%20enfrentan%20desaf%C3%ADos%20importantes%20ante%20la%20adaptaci%C3%B3n%20medioambiental%20a%20la%20realidad%20clim%C3%A1tica%20de%20Chile%2C> (acceso: 20 de Noviembre de 2022).
- [38] San Clemente, Región del Maule, Chile - sunrise, sunset, and daylength, January 2022. Sunrise and sunset times in San Clemente, January 2022. <https://www.timeanddate.com>

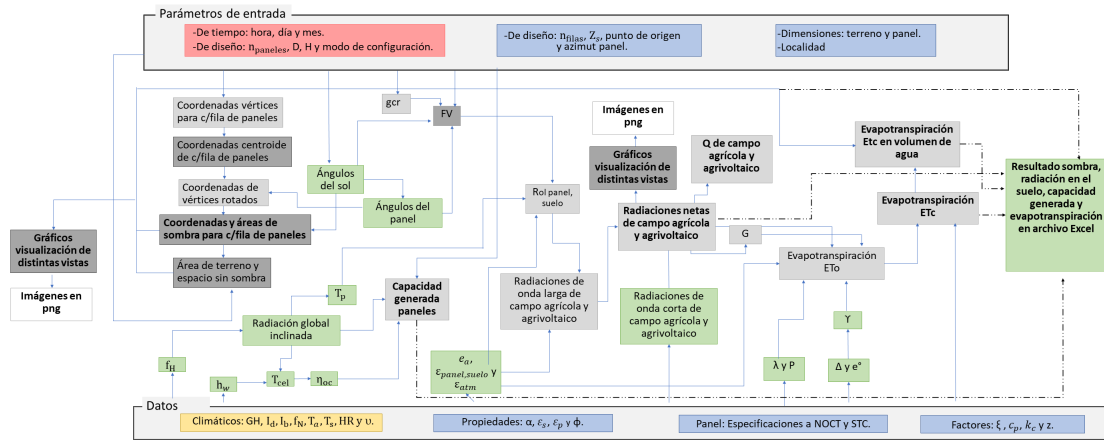
m/sun/@3872306?month=1&year=2022 .

- [39] Agrometeorología: INIA Agrometeorología. <https://agrometeorologia.cl/> .
- [40] Servicios Climáticos. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE2009> (acceso: 23 de Noviembre de 2022).
- [41] Panel solar dah 440W Mono Perc Half Cell: Casa Edison - Energía Solar, Tecnología y Electricidad.Casa Edison. <https://www.casaedison.cl/producto/panel-solar-dah-440-w-mono-perc-half-cell/1930> (acceso: 23 de Septiembre de 2022).
- [42] National Renewable Energy Laboratory (NREL). NREL. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77811.pdf> (acceso: 31 de Octubre de 2022).
- [43] S. Yassin Alsadi y Y. Fathi Nassar, “A general expression for the shadow geometry for fixed mode horizontal, step-like structure and inclined solar fields”, *Solar Energy*, vol. 181. Elsevier BV, pp. 53–69, mar. 2019. doi: [10.1016/j.solener.2019.01.090](https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.090).
- [44] Kalogirou, S. (2014) *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Amsterdam: Academic Press.
- [45] R. Agrawal, P.A. Bermel, y A. Perna. Orientation of photovoltaic modules to minimize intercepted radiation in photovoltaic AGLECTRIC Systems, *Justia*. <https://patents.justia.com/patent/20210067087>.
- [46] M. Silva, J. J. Roberts, y P. O. Prado, “Calculation of the Shading Factors for Solar Modules with MATLAB”, *Energies*, vol. 14, n° 15. MDPI AG, p. 4713, ago. 03, 2021. doi: [10.3390/en14154713](https://doi.org/10.3390/en14154713).
- [47] China multi row linkage flat single axis tracker manufacturers, suppliers - factory direct price - HDSOLAR. Hangzhou Huading New Energy Co., Ltd. <https://www.hdsolartech.com/solar-tracker/single-axis-solar-tracker/sprocket-type-multi-row-linkage-flat-single.html> (acceso: 1 de Noviembre de 2022).
- [48] Perna, A. (2019). *Modeling Irradiance Distributions in Agrivoltaic Systems*. thesis. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Modeling_Irradiance_Distributions_in_Agrivoltaic_Systems/9971399/1.
- [49] R. López-Olivari, S. Ortega-Farías, L. Morales, y H. Valdés, “Evaluation of three semi-empirical approaches to estimate the net radiation over a drip-irrigated olive orchard”, *Chilean journal of agricultural research*, vol. 75, n° 3. SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID), pp. 341–349, sep. 2015. doi: [10.4067/S0718-58392015000400011](https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000400011).
- [50] Honorato P., Ricardo y Cubillos A., Marcela. “Aspectos micromorfológicos de la evolución de los suelos rojo arcillosos de la zona central de Chile [VII región]”. *Agricultura Técnica*. v. 43(3) p. 255-262. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/41857>.
- [51] N. An, S. Hemmati, y Y.-J. Cui, “Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, n° 2. Elsevier BV, pp. 239–246, abr. 2017. doi: [10.1016/j.jrmge.2016.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.10.004).
- [52] V. Kapsalis y D. Karamanis, “On the effect of roof added photovoltaics on building’s energy demand”, *Energy and Buildings*, vol. 108. Elsevier BV, pp. 195–204, dic. 2015. doi: [10.1016/j.enbuild.2015.09.016](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.016).

- [53] P. Yang, L. H. C. Chua, K. N. Irvine, y J. Imberger, “Radiation and energy budget dynamics associated with a floating photovoltaic system”, *Water Research*, vol. 206. Elsevier BV, p. 117745, nov. 2021. doi: [10.1016/j.watres.2021.117745](https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117745).
- [54] M. Hammami, S. Torretti, F. Grimaccia, y G. Grandi, “Thermal and Performance Analysis of a Photovoltaic Module with an Integrated Energy Storage System”, *Applied Sciences*, vol. 7, n^o 11. MDPI AG, p. 1107, oct. 25, 2017. doi: [10.3390/app7111107](https://doi.org/10.3390/app7111107).
- [55] S. Odeh, “Thermal Performance of Dwellings with Rooftop PV Panels and PV/Thermal Collectors”, *Energies*, vol. 11, n^o 7. MDPI AG, p. 1879, jul. 19, 2018. doi: [10.3390/en11071879](https://doi.org/10.3390/en11071879).
- [56] View factors.pvectors 1.5.2 documentation. https://sunpower.github.io/pvectors/theory/view_factors.html#application (acceso: 27 de Octubre de 2022).
- [57] Main concepts. pvectors 1.5.2 documentation. <https://sunpower.github.io/pvectors/concepts/index.html> (acceso: 27 de Octubre de 2022).
- [58] G. B. Cavadini y L. M. Cook, “Green and cool roof choices integrated into rooftop solar energy modelling”, *Applied Energy*, vol. 296. Elsevier BV, p. 117082, ago. 2021. doi: [10.1016/j.apenergy.2021.117082](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117082).
- [59] F. J. Casares de la Torre, M. Varo, R. López-Luque, J. Ramírez-Faz, y L. M. Fernández-Ahumada, “Design and analysis of a tracking / backtracking strategy for PV plants with horizontal trackers after their conversion to agrivoltaic plants”, *Renewable Energy*, vol. 187. Elsevier BV, pp. 537–550, mar. 2022. doi: [10.1016/j.renene.2022.01.081](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.081).
- [60] C. Schwingshackl et al., “Wind Effect on PV Module Temperature: Analysis of Different Techniques for an Accurate Estimation”, *Energy Procedia*, vol. 40. Elsevier BV, pp. 77–86, 2013. doi: [10.1016/j.egypro.2013.08.010](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.010).
- [61] X. Li et al., “Modeling cherry orchard evapotranspiration based on an improved dual-source model”, *Agricultural Water Management*, vol. 98, n^o 1. Elsevier BV, pp. 12–18, dic. 2010. doi: [10.1016/j.agwat.2010.07.019](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.019).
- [62] Posición del Sol, Cálculo de la posición del sol en el cielo para cada lugar en cualquier momento. sunearthtools. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es.
- [63] P. Gese, F. Mancilla Martínez-Conde, G. Ramírez-Sagner, y F. Dinter, “Agrivoltaic in Chile – Integrative Solution to Use Efficiently Land for Food and Energy Production and Generating Potential Synergy Effects Shown by a Pilot Plant in Metropolitan Region”, *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019*. International Solar Energy Society, 2019. doi: [10.18086/swc.2019.19.04](https://doi.org/10.18086/swc.2019.19.04).
- [64] Solar Radiation Metrics Part-1. knowledge.autodesk. <https://knowledge.autodesk.com/support/revit/getting-started/caas/simplecontent/content/solar-radiation-metrics-part-1.html>(acceso: 31 de Octubre de 2022).

Anexo

Anexo A. Diagrama completo del algoritmo desarrollado



Leyenda

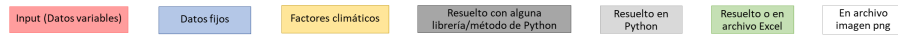


Figura A.1: Diagrama más detallado de la metodología de resolución.

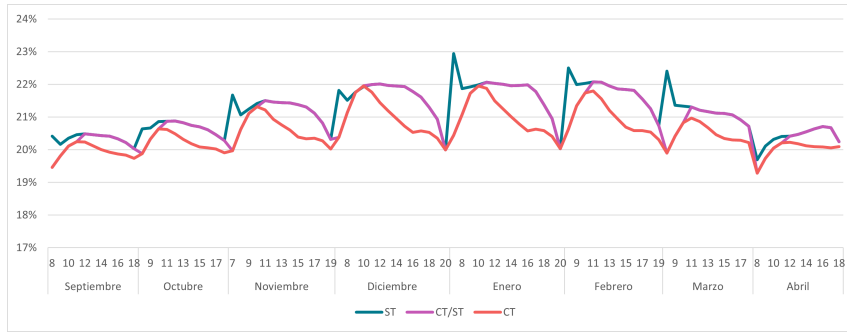
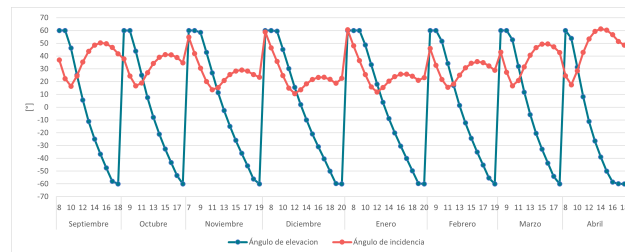
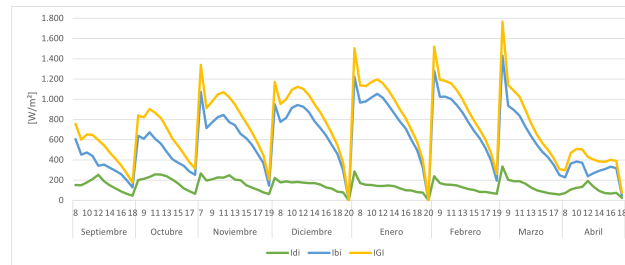


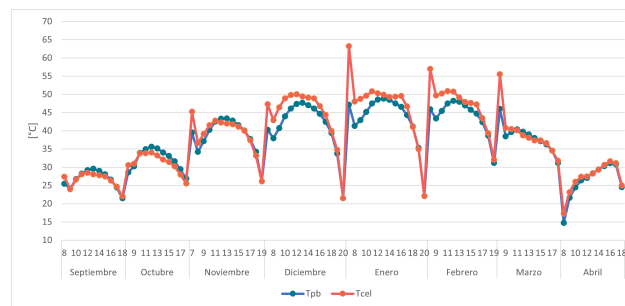
Figura B.3: Eficiencia de conversión del panel para cada modo de configuración para todo el periodo de evaluación por hora.



(a) Ángulos de elevación e incidencia.

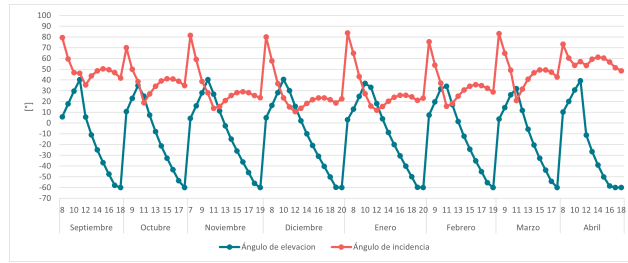


(b) Radiaciones directa, difusa y global inclinadas.

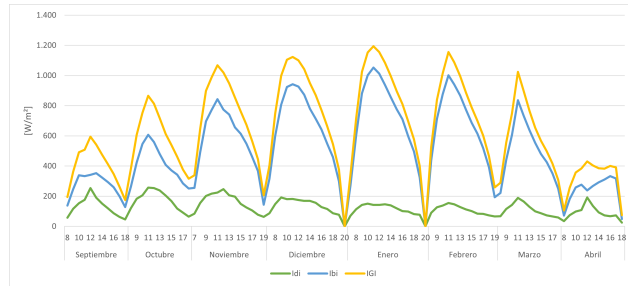


(c) Temperaturas trasera del panel y de la celda.

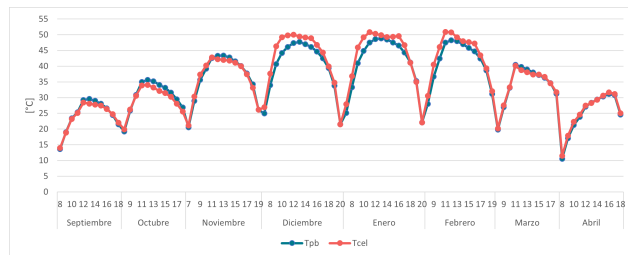
Figura B.4: Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo Sun Tracking.



(a) Ángulos de elevación e incidencia.

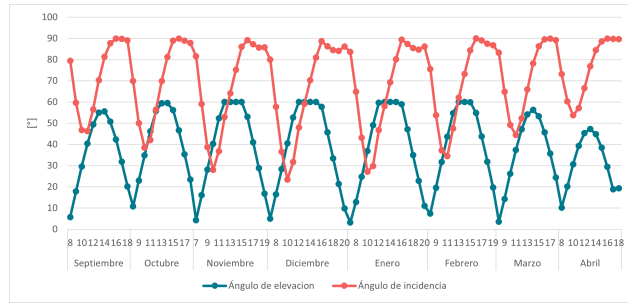


(b) Radiaciones directa, difusa y global inclinadas.

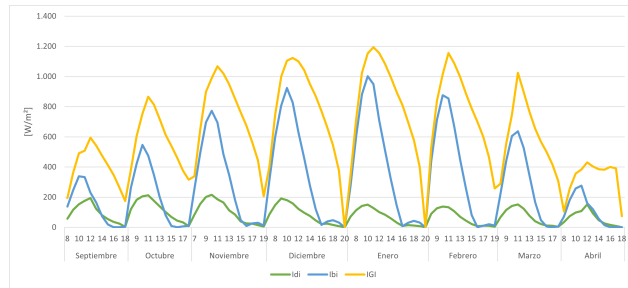


(c) Temperaturas trasera del panel y de la celda.

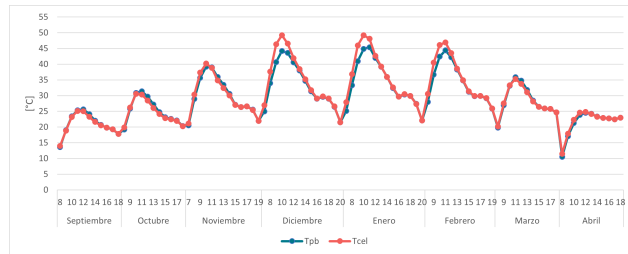
Figura B.5: Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo de equilibrio CT/ST.



(a) Ángulos de elevación e incidencia.



(b) Radiaciones directa, difusa y global inclinadas.



(c) Temperaturas trasera del panel y de la celda.

Figura B.6: Ángulos, radiaciones y temperaturas ligadas al panel para el modo Control Tracking.