

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**ANÁLISIS DEL USO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN SISTEMAS DE  
CLIMATIZACIÓN Y RIEGO PARA INVERNADEROS DESTINADOS A LA PEQUEÑA  
EMPRESA AGRÍCOLA EN EL VALLE CENTRAL DE CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**JORGE RICARDO PASCHKE CELEDÓN**

**PROFESOR GUÍA**

**RODRIGO DEMARCO BULL**

**PROFESOR CORREFERENTE**

**IGNACIO VERDUGO MONTECINOS**

**VALPARAÍSO, NOVIEMBRE DE 2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Análisis del uso de energías renovables en sistemas de climatización y riego para invernaderos destinados a la pequeña empresa agrícola en el Valle Central de Chile.

**Nombre del candidato(a):** Jorge Ricardo Paschke Celedón

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil Industrial

**Campus:** Casa Central **Departamento:** Industrias

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Andrés Demarco Bull, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 14/11/2025

**Firma:**

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 14/11/2025

**Firma:**

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## RESUMEN

El aumento de la población y la creciente demanda por alimentos ha generado una fuerte expansión agrícola en el mundo, lo que conlleva la destrucción de ecosistemas y la biodiversidad circundante. La solución a este problema es aumentar el rendimiento de la producción agrícola por metro cuadrado, lo cual se logra optimizando las condiciones climáticas requerida por los cultivos para su desarrollo, mediante la utilización de invernaderos especialmente si estos cuentan con un sistema de enfriamiento y de calefacción. Dicha tecnificación implica una alta inversión, pero a su vez genera altos beneficios mediante un incremento de las ventas de productos de gran calidad, debido al mayor rendimiento del suelo y al aumento de la cantidad de temporadas de producción anual, lo que justifica la evaluación técnica y económica de un proyecto de este tipo.

Para la calefacción de invernaderos típicamente se utilizan calderas a diésel y cuando la ventilación natural no es suficiente para el enfriamiento, una solución es utilizar ventiladores energizados desde la red. Debido a esto, en el presente estudio se evaluó técnica y económicamente la incorporación de energía solar y biomasa como ERNC, obteniendo como resultado que la energía renovable factible de utilizar es la biomasa, la cual es utilizada para reemplazar en un cierto porcentaje el calor generado por el diésel.

La evaluación económica se focaliza en la Pequeña Empresa Agrícola debido a la importancia que tiene en la producción de hortalizas en Chile y por el acceso a financiamiento para solventar la gran inversión en la climatización de un invernadero.

El invernadero que se estudió es de tipo multicapilla de  $2.000 \text{ m}^2$ , el cual va a estar ubicado en la comuna de San Felipe y producirá tomate de primera, en dos temporadas. El precio promedio del tomate de primera por kilogramo es de aproximadamente CLP 911 y la producción anual estimada en el invernadero es de  $180.576 \text{ [kg]}$ , lo cual evidentemente generaría un ingreso anual promedio de CLP 164.417.925.

Dentro de las principales inversiones se encuentran las calderas de biomasa y de diésel, además de todo el sistema de calefacción por tuberías con agua caliente alrededor del cultivo y dentro de los costos operacionales más relevantes se encuentran el costo de la biomasa y del diésel como combustibles, el cual representa el 58% del total.

La fracción de energía térmica que entrega la caldera de biomasa al invernadero se

va a denominar fracción de biomasa (FBM), la cual determina la potencia de la caldera y con ello la inversión y los costos operacionales asociados a ésta.

El proyecto se evaluó económicamente a 10 años con una tasa de descuento de 12%, para un 50% y 75% de financiamiento y distintos valores de FBM.

Como resultado se obtuvo que la opción más conveniente es el proyecto financiado a un 75%, y una FBM de 0,8, en donde, la inversión es de CLP 219.993.928, el VAN es de CLP 106.305.693, la TIR es de 31% y el PRI es de 6 años.

En el análisis de riesgo el proyecto tiene una probabilidad igual a cero de tener un IVAN menor a 30% y una probabilidad igual a 28,6% de tener un IVAN menor a 50%.

La FBM de 0,8 determinó que la potencia de la caldera de biomasa y diésel sea de 270 [kW] y 70 [kW] respectivamente.

# INDICE DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.1.	CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN .....	10
1.2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	12
1.3.	OBJETIVOS.....	13
1.4.	ALCANCE .....	14
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1.	ANTECEDENTES GENERALES DE UN INVERNADERO.....	15
2.2.	MERCADO DE HORTALIZAS EN CHILE .....	16
2.3.	CICLOS DE CULTIVO .....	22
2.4.	RENDIMIENTO POR PLANTA Y PRODUCCIÓN ANUAL.....	23
2.5.	PEQUEÑA Y MEDIANA AGRICULTURA EN CHILE .....	26
2.6.	TIPOLOGÍA DE INVERNADEROS .....	28
2.7.	DIMENSIONAMIENTO DE UN INVERNADERO TIPO DAM .....	31
2.8.	IDENTIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS SUPERFICIES DEL INVERNADERO .....	33
2.9.	VENTANAS DEL INVERNADERO.....	35
2.10.	ORIENTACIÓN DEL INVERNADERO .....	38
2.11.	MATERIALES CONSTRUCTIVOS PARA UN INVERNADERO .....	39
2.12.	PARÁMETROS CLIMÁTICOS A CONTROLAR EN UN INVERNADERO .....	40
2.13.	RADIACIÓN INCIDENTE.....	43
2.14.	ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN DIRECTA .....	44
2.15.	TRANSMISIVIDAD, REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD EN UN INVERNADERO.....	46
2.16.	BALANCE ENERGÉTICO DE UN INVERNADERO .....	49
2.17.	NOMENCLATURA DE VARIABLES Y PARÁMETROS PARA EL BALANCE RADIATIVO .....	51
2.18.	RADIACIÓN NETA .....	52
2.19.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN-CONDUCCIÓN .....	61
2.20.	PÉRDIDA DE CALOR POR EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	62
2.21.	PÉRDIDAS DE CALOR POR VENTILACIÓN.....	63
2.22.	PÉRDIDA DE CALOR A TRAVÉS DEL SUELO .....	64
2.23.	SISTEMA DE CALEFACCIÓN .....	65
2.24.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR AGUA.....	67
2.25.	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN INVERNADEROS .....	73

2.26.	RIEGO .....	76
2.27.	ERNC UTILIZADAS EN INVERNADEROS .....	78
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>84</b>
3.1.	LOCALIZACIÓN DEL INVERNADERO.....	84
3.2.	PARÁMETROS CLIMÁTICOS DE SAN FELIPE .....	84
3.3.	DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL INVERNADERO .....	86
3.4.	DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	87
3.5.	DETERMINACIÓN DE LA TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA .....	88
3.6.	DETERMINACIÓN DE LA ABSORTIVIDAD Y EMISIVIDAD DEL SUELO .....	89
3.7.	DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA .....	90
3.8.	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE CLIMATIZACIÓN .....	91
3.9.	MÉTODO DE ENFRIAMIENTO.....	92
3.10.	MÉTODO DE CALEFACCIÓN .....	94
3.11.	MÉTODO DE RIEGO.....	95
3.12.	DETERMINACIÓN DE ERNC A UTILIZAR .....	97
<b>4.</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA.....</b>	<b>102</b>
4.1.	INVERSIÓN .....	102
4.2.	COSTOS OPERACIONALES.....	106
4.3.	DEPRECIACIÓN.....	109
4.4.	FINANCIAMIENTO .....	110
4.5.	INGRESOS .....	111
4.6.	FLUJO DE CAJA .....	116
4.7.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	117
4.8.	ANÁLISIS DE RIESGO .....	118
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>120</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>122</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>129</b>

# INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 SUPERFICIE AGRÍCOLA DE HORTALIZAS ANUAL EN CHILE DESDE 2015 HASTA 2024.....	17
TABLA 2.2 SUPERFICIE AGRÍCOLA DE TOMATE EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO DESDE 2015 HASTA 2024. ....	21
TABLA 2.3 DURACIÓN EN DÍAS DE CADA ETAPA FENOLÓGICA DEL TOMATE. ....	23
TABLA 2.4 TASA DE INTERÉS ANUAL DE CRÉDITOS DE BANCO ESTADO PARA LA PEQUEÑA EMPRESA AGRÍCOLA. ....	28
TABLA 2.5 TEMPERATURAS CRÍTICAS Y ÓPTIMAS DEL TOMATE (TESI, 2001).....	41
TABLA 2.6 NOMENCLATURA DE VARIABLES Y PARÁMETROS PARA REALIZAR EL BALANCE RADIATIVO .....	52
TABLA 2.7 COEFICIENTE DE CULTIVO DEL TOMATE SEGÚN LA ETAPA DE CRECIMIENTO.....	63
TABLA 3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO DEL INVERNADERO MULTICAPILLA DAM. ....	86
TABLA 3.2 CANTIDAD DE MÓDULOS Y DIMENSIONES DEL INVERNADERO MULTICAPILLA DAM.....	86
TABLA 3.3 SUPERFICIES DEL INVERNADERO MULTICAPILLA TIPO DAM .....	87
TABLA 3.4 VARIABLES PRODUCTIVAS DE INVERNADERO Y PRODUCCIÓN ANUAL DE TOMATES .....	88
TABLA 3.5 CONSUMO DIURNO DE ENERGÍA SOLAR Y DESDE LA RED POR CADA MES .....	99
TABLA 3.6 CONSUMO DIURNO ANUAL DE ENERGÍA SOLAR Y DESDE LA RED .....	100
TABLA 3.7 INGRESO ANUAL POR VENTA DE ENERGÍA SOLAR Y COSTO ANUAL POR CONSUMO DE ENERGÍA DE LA RED. ....	100
TABLA 3.8 INVERSIÓN PARA LA INSTALACIÓN DE LOS 26 PANELES .....	101
TABLA 4.1 POTENCIA DE CALEFACCIÓN PARA LA CALDERA DE BIOMASA Y DE DIÉSEL .....	102
TABLA 4.2 COSTOS ASOCIADOS A LA CALDERA DE BIMASA Y DIÉSEL SEGÚN LA FBM [CLP] .....	103
TABLA 4.3 TABLA RESUMEN DEL COSTO DE CAPITAL FIJO SIN CONSIDERAR EL COSTO ASOCIADO A LAS CALDERAS .....	103
TABLA 4.4 CAPITAL FIJO TOTAL PARA CADA FBM A UTILIZAR EN LA EVALUACIÓN.....	104
TABLA 4.5 CAPITAL DE TRABAJO DE LA PRIMERA TEMPORADA NOVIEMBRE – MARZO. ....	105
TABLA 4.6 INVERSIÓN TOTAL EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL INVERNADERO .....	105
TABLA 4.7 INVERSIÓN TOTAL PROMEDIO.....	105
TABLA 4.8 COSTOS OPERACIONALES ANUALES DE REFERENCIA DE UN INVERNADERO DE 1 HECTÁREA EL AÑO 2014 .....	106
TABLA 4.9 COSTOS OPERACIONALES ANUALES DE REFERENCIA AJUSTADOS AL INVERNADERO EN ESTUDIO.....	107
TABLA 4.10 COSTOS OPERACIONALES DE MANTENCIÓN DE LA CUBIERTA Y EQUIPOS DEL INVERNADERO .....	107
TABLA 4.11 COSTOS OPERACIONALES AJUSTADOS SEGÚN LA ECUACIÓN 4.1 Y EL COSTO TOTAL DE MANTENCIÓN.....	108
TABLA 4.12 COSTO ANUAL DE LA BIOMASA Y DEL DIÉSEL PARA EL INVERNADERO EN FUNCIÓN DE LA FBM .....	108
TABLA 4.13 COSTO OPERACIONAL TOTAL ANUAL DEL INVERNADERO EN FUNCIÓN DE LA FBM .....	109
TABLA 4.14 VIDA ÚTIL DEL CAPITAL FIJO DEL INVERNADERO .....	109
TABLA 4.15 DEPRECIACIÓN LINEAL DURANTE EL PERIODO DE EVALUACIÓN Y EL VALOR LIBRO.....	110
TABLA 4.16 VALOR DEL CRÉDITO Y DE LA CUOTA CONSTANTE. ....	111
TABLA 4.17 PRECIO MAYORISTA DEL TOMATE DE PRIMERA PROCEDENTE DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO .....	111

TABLA 4.18 PRECIO MAYORISTA PRONOSTICADO PARA EL TOMATE DE PRIMERA DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO [CLP].....	113
TABLA 4.19 PREVISIÓN DEL PRECIO CON UN INTERVALO DE CONFIANZA DE 95% PARA UNA DISTRIBUCIÓN T STUDENT [CLP] ...	115
TABLA 4.20 INGRESOS POR VENTA PRONOSTICADOS DEL TOMATE PRODUCIDO EN EL INVERNADERO [CLP] .....	115
TABLA 4.21 RESULTADOS DEL FLUJO DE CAJA PARA 50% DE FINANCIAMIENTO .....	116
TABLA 4.22 RESULTADOS DEL FLUJO DE CAJA PARA UN FINANCIAMIENTO DE 75% .....	116
TABLA 4.23 ELASTICIDAD DEL VAN PARA UN 50% DE FINANCIAMIENTO.....	117
TABLA 4.24 ELASTICIDAD DEL VAN PARA UN 75% DE FINANCIAMIENTO.....	117

## INDICE DE GRAFICOS

GRÁFICO 2.1 SUPERFICIE AGRÍCOLA DE HORTALIZAS ANUAL EN CHILE. ....	18
GRÁFICO 2.2 DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA SUPERFICIE HORTÍCOLA, AÑO 2024 .....	19
GRÁFICO 2.3 DISTRIBUCIÓN REGIONAL DE LA SUPERFICIE AGRÍCOLA DE TOMATES, AÑO 2024 .....	20
GRÁFICO 2.4 SUPERFICIE AGRÍCOLA DE TOMATE EN LA REGIÓN DE VALPARAÍSO DESDE 2015 HASTA 2024.....	21
GRÁFICO 4.1 PRECIO MAYORISTA DEL TOMATE DE PRIMERA PROVENIENTE DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO.....	112
GRÁFICO 4.2 PRECIO MAYORISTA PRONOSTICADO DEL TOMATE DE PRIMERA DE LA REGIÓN DE VALPARAÍSO .....	113
GRÁFICO 4.3 HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO PARA EL VAN .....	119

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DISTRIBUCIÓN DE CAMELLONES Y PLANTAS AL INTERIOR DEL INVERNADERO .....	24
FIGURA 2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS EMPRESAS AGRÍCOLAS SEGÚN EL VBP (QUALITAS AGROCONSULTORES, 2009) .....	27
FIGURA 2.3 TIPOS DE INVERNADEROS EN LA PYME AGRÍCOLA DE CHILE (RUIZ & MARTÍNEZ, 2020).....	29
FIGURA 2.4 VENTILACIÓN PASIVA INVERNADERO TIPO DAM (GONZÁLEZ A., 2004) .....	30
FIGURA 2.5 INVERNADERO MULTICAPILLA CON TECHO CURVO. (HORTICOM, 2025).....	31
FIGURA 2.6 INVERNADERO MULTICAPILLA TIPO DAM. ....	31
FIGURA 2.7 VISTAS DEL MÓDULO DE UN INVERNADERO MULTICAPILLA TIPO DAM. ....	32
FIGURA 2.8 SUPERFICIES DEL MÓDULO DE UN INVERNADERO MULTICAPILLA TIPO DAM .....	34
FIGURA 2.9 VISTA ESQUEMÁTICA DE LA DISPOSICIÓN DE VENTANAS EN UN MÓDULO TIPO DAM.....	36
FIGURA 2.10 VISTA ESQUEMÁTICA FRONTAL DE LAS VENTANAS CENITAL Y LATERAL DEL INVERNADERO. ....	37
FIGURA 2.11 ORIENTACIÓN CORRECTA RESPECTO DEL VIENTO (GONZÁLEZ A., 2004). ....	38

FIGURA 2.12	ÁNGULO DE INCIDENCIA SOBRE UNA SUPERFICIE.....	45
FIGURA 2.2.13	TRANSMISIVIDAD EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN DIRECTA. ....	47
FIGURA 2.2.14	BALANCE DE ENERGÍA DE INVERNADERO EN ESTADO ESTACIONARIO .....	50
FIGURA 2.15	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR AGUA CALIENTE.....	68
FIGURA 2.16	VISTA TRASVERSAL DE UN CAMELLÓN CON UN TUBO DE PE ALREDEDOR DE LAS PLANTAS.....	69
FIGURA 2.17	VISTA ESQUEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LOS VENTILADORES EN EL INVERNADERO .....	75

# INTRODUCCIÓN

## 1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la población mundial y el aumento de los niveles de vida provocan inevitablemente la expansión e intensificación del uso de la tierra agrícola para satisfacer la creciente demanda de alimentos en el mundo, no obstante, el ritmo de crecimiento de la tierra cultivable es menor que el crecimiento de la población a nivel global, lo que ha traído como consecuencia que el cultivo per cápita disminuyera en 10 %, desde 2003 a 2019. Frente a esta situación los objetivos de desarrollo sustentable para 2030 establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), buscan mejorar los niveles de seguridad alimentaria en el mundo, mediante el incremento de la productividad o rendimiento de los cultivos por metro cuadrado de superficie agrícola, logrando de esta forma que el aumento de la superficie agrícola sea gradual y sostenible en el tiempo y no afecte negativamente los ecosistemas (Potapov, et al., 2022).

Un incremento en la productividad y en la calidad de los cultivos se logra si las condiciones climáticas, tales como temperatura y humedad relativa, son óptimas para su desarrollo. En este sentido la función de los invernaderos se trata precisamente de controlar dichas variables climáticas para mantenerlas en sus valores óptimos, lo cual permite a los agricultores poder extender la producción de sus cultivos fuera de temporada, mejorar la calidad del cultivo y el rendimiento de la producción por metro cuadrado (Lobos Rodríguez, et al., 2022).

Para mantener las condiciones climáticas al interior de un invernadero en sus niveles óptimos se requiere de un gran consumo de energía, el cual depende de las condiciones climáticas e hídricas del lugar y del tipo de cultivo (González, et al., 2017). El consumo de energía para controlar el clima en un invernadero conlleva una inversión en equipos de calefacción y enfriamiento y costos operacionales asociados al combustible para calefacción y a la electricidad para las bombas y ventiladores. En este sentido la utilización de ERNC como complemento a las energías convencionales (diésel y electricidad de la red), disminuiría los costos operacionales con respecto al uso de combustible diésel, debido al uso de energía solar térmica y al menor costo que tiene la biomasa. Del mismo modo el costo por

consumo de electricidad desde la red disminuiría por el uso de energía solar fotovoltaica, no obstante, al mismo tiempo, se incrementaría la inversión en equipos, tales como, colectores térmicos solares, caldera para biomasa y paneles fotovoltaicos. Por otro lado, se cumpliría el objetivo desde el punto de vista ambiental de lograr una producción agrícola sustentable.

El uso de invernaderos en la producción agrícola de Chile tiene larga data, aunque su evolución ha sido lenta. Entre sus principales avances está la diversificación de cultivos, los tipos de materiales para su construcción y la tecnificación del riego (Ruiz & Martínez, 2020)). De esto último se puede inferir que la tecnificación en sistemas de climatización para invernaderos no está desarrollada en el país, no obstante, el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile instaló un invernadero con sistema de climatización alimentado con geotermia de baja entalpía en la comuna de Panguipulli en 2022, en un invernadero de 600 metros cuadrados para la producción de tomates. Este proyecto fue financiado con fondos públicos para promover la innovación y desarrollo de la agricultura sostenible.

Existen estudios en donde se analiza la incorporación de energías renovables para alimentar los sistemas de climatización de invernaderos, tales como, el estudio de Escobedo-Bretado, et al. (2016), quienes realizaron un análisis térmico por simulación de un invernadero de 1,6 hectáreas para tomate en el norte de México, mediante el software TRNSYS, para dimensionar un sistema de calefacción utilizando un sistema termosolar combinado con gas LP, donde se determinó el equipamiento que satisface técnica y económicamente los requerimientos necesarios para el óptimo desarrollo del cultivo en temporada de invierno con un uso de energía solar de 72%. En otro estudio, realizado por González, et al, (2017) se analizó el comportamiento de un invernadero tipo túnel sencillo, de 180 m<sup>2</sup> de suelo cubierto, con un sistema de calefacción asistido por energía solar, evaluando dos cubiertas plásticas mediante el uso de un software de simulación dinámica en la ciudad de Durango, México, en donde se obtuvo como conclusión que la temperatura interior del invernadero sin climatizar no se mantiene dentro del rango óptimo necesario para el cultivo, por lo que es necesario utilizar sistemas de climatización a lo largo del año, donde la incorporación de sistemas solares para climatizar genera un ahorro en el consumo de energía destinada a la calefacción.

Gran parte de la producción agrícola del país se encuentra en el Valle Central, el

cual, se encuentra entre la cordillera de los Andes y la cordillera de la costa y comienza en la región de Valparaíso y termina en la región del Maule. En esta zona la temperatura en verano puede superar los 30°C y en invierno puede alcanzar mínimas de hasta 1,5°C, en tanto que el rango óptimo de temperatura diurna del tomate, por ejemplo, es 23-26°C y el rango óptimo de temperatura nocturna es 13-16°C. Por este motivo se utilizan mallas de sombreado para el calor y mallas térmicas para el frío para proteger los cultivos, no obstante, dichas protecciones no garantizan que las temperaturas sean óptimas, lo que implica que con ello tampoco se garantiza la optimización del rendimiento por metro cuadrado del cultivo.

La Pequeña Empresa Agrícola está constituida por pequeños y medianos productores agrícolas, los cuales representan casi el 90% del total de los productores agropecuarios del país. En explotaciones pequeñas participa el 74,5% de los productores y en explotaciones medianas el 18,6%. Estas explotaciones agrícolas tienen una superficie que representa menos de 12% de la superficie agrícola total, con 3,8% para la pequeña explotación y 7,1% para la mediana explotación. (INE, 2009). Esto implica que el segmento de la Pequeña Empresa Agrícola es un actor relevante en la seguridad alimentaria del país y por lo tanto, para que el aumento de la producción conlleve un aumento gradual y sustentable de la superficie agrícola, mediante el incremento del rendimiento de la cosecha por metro cuadrado y la producción fuera de temporada, es importante evaluar la rentabilidad de la instalación de invernaderos climatizados con ERNC para la Pequeña Empresa Agrícola dentro del Valle Central.

## **1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El presente estudio busca configurar un sistema de climatización para invernaderos de producción hortícola dentro del Valle Central que utilice un cierto porcentaje de ERNC.

Entonces las preguntas que se deben responder son las siguientes:

- ¿Es factible económicamente para la Pequeña Empresa Agrícola instalar un invernadero con climatización automatizada y ERNC en el Valle Central?
- ¿Cuáles son los principales costos operacionales?
- ¿Qué porcentaje de energía solar y de biomasa es el más conveniente?

- ¿Cuál es el nivel de financiamiento más conveniente?

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la factibilidad técnica y económica de instalar un invernadero con sistemas de climatización automatizados, alimentados con ERNC y energía convencional, para la Pequeña Empresa Agrícola dentro del Valle Central, mediante un análisis de gestión energética que permita optimizar la productividad, la calidad de la cosecha y producir fuera de temporada.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la producción anual del invernadero, mediante datos asociados al rendimiento de las plantas y la superficie de cultivo.
- Determinar los costos de producción y el precio del cultivo mediante datos públicos de referencia.
- Determinar la cantidad de agua diaria que se debe suministrar al cultivo del invernadero, mediante un balance hídrico.
- Determinar el consumo de energía de los equipos de climatización a instalar en el invernadero, mediante el cálculo de la potencia y la cantidad de horas de funcionamiento de los equipos.
- Determinar el costo de los equipos de climatización y de ERNC de acuerdo con el porcentaje de energía solar y biomasa establecido para el análisis.

- Evaluar la inversión, con indicadores económicos y ambientales mediante un flujo de caja proyectado a 10 años para diferentes porcentajes de financiamiento y porcentajes de ERNC a utilizar.

#### **1.4. ALCANCE**

El invernadero a estudiar estará localizado en San Felipe, región de Valparaíso debido a que esta es una comuna de gran actividad agrícola que se encuentra dentro del Valle Central.

Para el desarrollo del estudio la superficie cubierta por el invernadero estará acotada a 0,2 hectáreas, lo que corresponde a uno de los requisitos mínimos para calificar como Pequeña Explotación Agrícola Empresarial.

El cultivo seleccionado para el estudio es el tomate debido a su importancia dentro de la producción agrícola nacional de hortalizas.

Las fuentes de información de parámetros climáticos se obtuvieron de la Dirección Meteorológica de Chile, el Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile y Tiempo3.com.

Las fuentes de ERNC seleccionadas son la energía solar y la biomasa debido a la accesibilidad para ser utilizadas en la climatización de invernaderos y se descarta la energía geotérmica debido a la gran inversión inicial en excavación y la instalación del sistema bajo tierra.

El análisis va a considerar la comparación de alternativas con respecto al porcentaje de financiamiento, la pertinencia de la instalación de energía solar y biomasa y el porcentaje de energía renovable a utilizar.

# MARCO TEÓRICO

## 2.1. ANTECEDENTES GENERALES DE UN INVERNADERO

Los invernaderos básicamente son estructuras cubiertas por vidrio o algún tipo de plástico que permiten, cultivar en su interior hortalizas o flores fuera de temporada, acortar los ciclos vegetativos, aumentar la productividad y calidad de los cultivos, mediante el control del clima interior (Lobos Rodríguez, et al., 2022).

Los invernaderos se pueden clasificar según su grado de tecnificación, en invernaderos de tecnología alta, media o baja. En general los invernaderos de alta tecnología son los que cuentan con sistemas de climatización y riego totalmente automatizados y los invernaderos con tecnificación media son los que cuentan con equipos de climatización y riego parcialmente automatizados, en tanto que los invernaderos de baja tecnificación son los que no cuentan con ningún equipo de climatización (Harnois Industries, 2024).

En términos de productividad el cultivo bajo invernadero tiene una mayor producción por unidad de área que el cultivo al aire libre y a su vez la implementación de mayor tecnología en los invernaderos genera una mayor producción por unidad de área que los invernaderos con menor tecnología. Por ejemplo, el rendimiento para el cultivo de tomate al aire libre, de tecnología media y de alta tecnología es de 12, 35 y 50 [kg m<sup>-2</sup>] respectivamente (Gaxiola Carrasco, 2010).

En invernaderos tecnificados la demanda de climatización, (calefacción o enfriamiento) surge de la interacción entre los requerimientos térmicos del cultivo y del ambiente exterior. Esta relación determina la necesidad de mantener una temperatura interna estable, lo cual es clave para alcanzar altos rendimientos agrícolas (Valera et al., 2008).

Un sistema de climatización de invernadero puede ser abastecido por energía convencional (gas o diésel) y energía solar, en donde la fracción solar (FS) ya sea mensual o anual, es la fracción del total de energía que es abastecida por el sistema solar. Frecuentemente los sistemas solares son diseñados para obtener una FS en particular, es decir, para obtener un cierto nivel deseado en la sustitución de energía convencional (Domínguez, et al., 2012). De manera análoga al concepto de fracción solar (FS), la integración de biomasa como fuente de energía renovable en sistemas de calefacción para

invernaderos permite definir una fracción de biomasa (FBM), la cual representa el porcentaje de la demanda térmica total cubierta por este recurso.

La FS permite definir la cantidad de paneles fotovoltaicos y colectores solares a utilizar en el sistema de climatización del invernadero, de la misma forma, la FBM permite definir la potencia de la caldera de biomasa y de diésel. Lo anterior es relevante para determinar la inversión en equipos y el costo operacional por consumo de combustible.

## **2.2. MERCADO DE HORTALIZAS EN CHILE**

### **2.2.1. DEMANDA DE HORTALIZAS**

La demanda de hortalizas en Chile muestra un comportamiento dinámico, influenciado por factores estacionales, tendencias de consumo saludable y variaciones en la producción y precios.

La promoción de hábitos saludables por parte de instituciones públicas ha favorecido el consumo de hortalizas frescas, lo que se refleja en que el consumo per cápita de verduras en 2023 fue de aproximadamente 97,9 kg, lo cual indica que las hortalizas están entre los alimentos más consumidos del país (Informes de expertos, 2023).

El comportamiento de la demanda es altamente estacional, por ejemplo, durante los meses de primavera y verano aumentan los precios y la demanda de productos de temporada, mientras que en invierno tienden a bajar, como se observa en los precios mayoristas de las principales especies hortícolas.

El mercado nacional está dominado por unas pocas especies, el tomate lidera en valor transado, seguido por cebolla, pimiento, poroto, lechuga, choclo, ajo, sandía, pepino y repollo. Estas diez especies representaron el 76% del valor transado en los principales mercados mayoristas en 2020. (Equipo Redagrícola, s.f.).

La demanda interna absorbe la mayor parte de la producción, lo cual se visualiza en el hecho de que 83% del comercio hortícola nacional se realiza a través de los mercados mayoristas, lugar en donde se fijan los precios diarios (HortiCrece, s.f.).

En términos de proyecciones, el mercado de hortalizas en Chile en 2025 generará ingresos de alrededor de US \$4.220 millones, con una proyección anual de crecimiento

compuesto del 6,1 % entre 2025 y 2030 (Statista, s.f.).

### **2.2.2. OFERTA DE HORTALIZAS**

El aumento y la disminución de superficie de hortalizas, tanto por región como por cultivo, obedece al gran dinamismo que ofrece la producción de hortalizas, donde, por lo general, los grandes productores están especializados y producen bajo contrato ciertas especies, mientras que los medianos y pequeños adaptan sus superficies de siembra año a año, de acuerdo a los precios de la temporada anterior, a una demanda relativa y a las condiciones que se presenten de clima y suministro de agua de riego, lo que en las actuales condiciones es uno de los factores más importantes al momento de la decisión de siembra o plantación (Equipo Redagráfica, s.f.).

En 2019 la superficie nacional de hortalizas para consumo fresco se estimó en 77.243 hectáreas, donde sólo 12 especies representan más del 75% de la superficie de hortalizas nacional, siendo las principales, tomate, choclo, cebolla, poroto, lechuga y zanahoria. Estas seis especies que dan cuenta de más del 53% de la superficie hortícola nacional (Equipo Redagráfica, s.f.).

En base a lo anterior se puede establecer que la evolución de la superficie agrícola de hortalizas es un indicador de la oferta de dichos alimentos en el tiempo.

#### **2.2.2.1. Evolución de la superficie agrícola de hortalizas desde 2015 hasta 2024**

A continuación, se presenta la evolución de la superficie agrícola de hortalizas desde el año 2015 hasta el año 2024 en la Tabla 3.1 y el Gráfico 3.1. (INE, s.f.).

Tabla 2.1 Superficie agrícola de hortalizas anual en Chile desde 2015 hasta 2024.

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Hectáreas	63.776	69.845	70.707	77.221	77.243	80.392	79.331	84.494	82.435	83.774

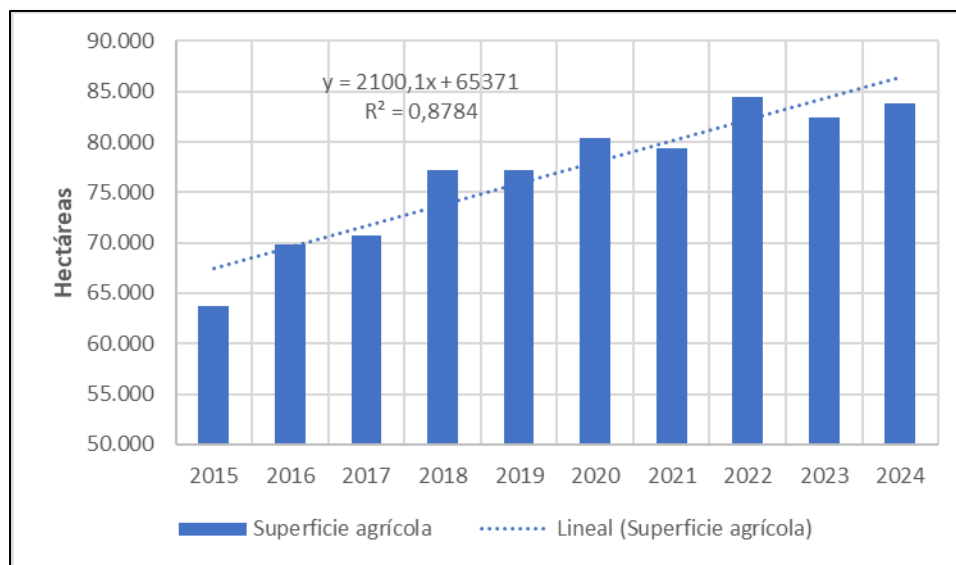


Gráfico 2.1 Superficie agrícola de hortalizas anual en Chile.

Al observar el Gráfico 2.1 se puede ver que el incremento total de superficie agrícola de hortalizas entre 2015 y 2024 es de 19.998 hectáreas, lo que significa un incremento de 31,4%.

Se puede observar que los incrementos interanuales se producen marcadamente en los años 2016, 2018, 2020, 2022, en los otros años existe un incremento o decrecimiento leve, de forma tal que el comportamiento de esta expansión agrícola se puede ajustar mediante una línea de tendencia lineal de carácter creciente, la cual presenta un buen ajuste con  $R^2 = 0,88$  y en donde el incremento promedio es igual a 2.100 hectáreas por año, lo cual evidencia que la oferta de hortalizas es sostenida y creciente en el mediano y largo plazo.

#### 2.2.2.2. Superficie agrícola de hortalizas por región

Para establecer la distribución de la oferta de hortalizas por región se muestra a continuación el Gráfico 2.2, obtenido a partir de los datos de la Encuesta de superficie de hortalizas del año 2024 publicada por el INE., donde la superficie hortícola total en el país fue de 83.774 hectáreas. En el Gráfico 2.2 se puede ver que la superficie agrícola de hortalizas se concentra principalmente entre la región de Coquimbo y la región del Maule, siendo la región Metropolitana la zona que concentra la mayor producción en el país.

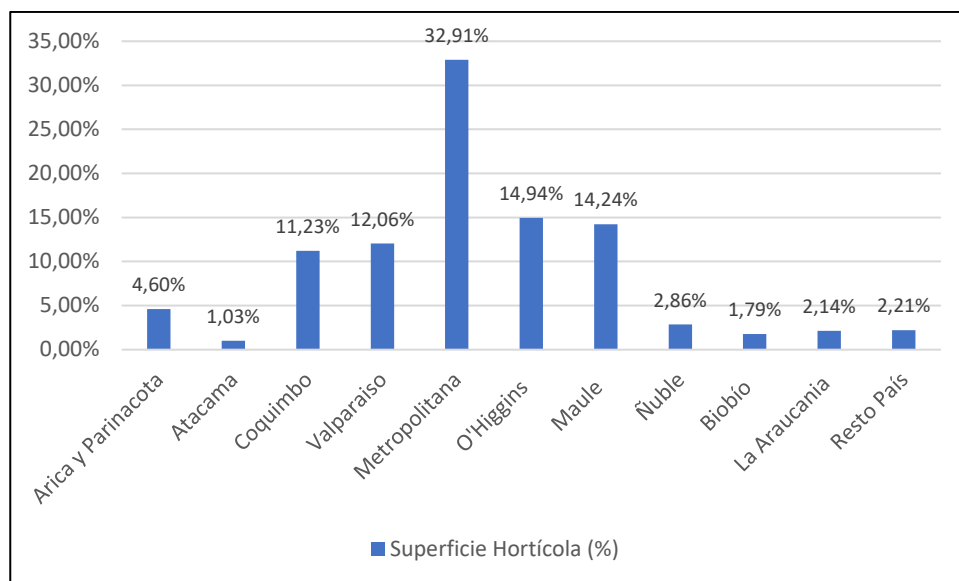


Gráfico 2.2 Distribución regional de la superficie hortícola, año 2024

### 2.2.2.3. Principales hortalizas cultivadas bajo invernadero

El censo agropecuario de 2021 del INE presenta cuadros estadísticos correspondientes a la cantidad de superficie cultivada de hortalizas al aire libre y bajo cubierta, especificando que el término bajo cubierta significa que los cultivos están protegidos bajo algún tipo de cobertura, lo que se puede interpretar como invernaderos. Lo que no se especifica es si los invernaderos tienen control climático. Al respecto, se sabe que la producción agrícola en Chile se ha focalizado en diversificar las especies cultivadas y en incorporar tecnología para el riego (Ruiz & Martínez, 2020), de lo que se puede inferir que la incorporación de tecnología para control climático en cultivo de hortalizas bajo invernaderos no ha tenido un desarrollo a nivel comercial en el país, especialmente en la Pequeña Empresa Agrícola.

Analizando los datos del censo agropecuario de 2021, se puede obtener que el porcentaje de superficie de hortaliza bajo invernadero con respecto al total de superficie hortalizas en el país es igual a 6,28%, aproximadamente un 4% más que los datos del censo agropecuario de 2007. Esto indica que hay un crecimiento en la oferta de hortalizas bajo cubierta desde el 2007 al 2021, no obstante, el porcentaje anual existente continúa siendo muy bajo con respecto a la superficie de cultivo al aire libre.

También en base a los mismos datos del censo agropecuario de 2021 se pudo determinar el porcentaje de superficie cubierta de cada especie de hortaliza con respecto de la superficie cubierta total de hortalizas, donde destacan como los principales porcentajes la lechuga, el pepino, el pimiento y el tomate con un 9,2%, 6,7%, 8,8% y 42,1% respectivamente (INE, s.f.), lo que implica que el tomate es la principal hortaliza que se cultiva bajo cubierta en Chile.

En base a lo anterior, el presente estudio se va a focalizar en el tomate por ser la hortaliza con mayor porcentaje de cultivo bajo invernadero.

#### 2.2.2.4. Superficie agrícola de tomate por región

Para establecer la distribución de la oferta de tomate de consumo fresco por región se muestra a continuación el Gráfico 2.3, elaborado a partir de los datos de la Encuesta de superficie de hortalizas del año 2024 publicada por el INE, donde la superficie agrícola de tomates total en el país fue de 5.927 hectáreas

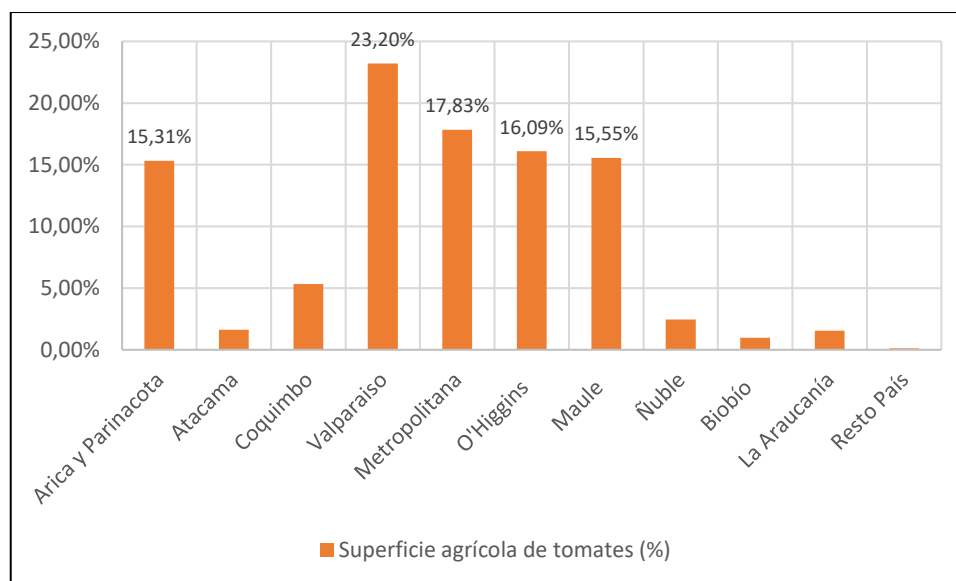


Gráfico 2.3 Distribución regional de la superficie agrícola de tomates, año 2024

En el Gráfico 2.3 se puede ver que la superficie agrícola de tomate se concentra

principalmente en el Valle Central, el cual está entre la región de Valparaíso y la región del Maule. También se puede observar que la región de Valparaíso es la que tiene la mayor cantidad de superficie agrícola de tomates y debido a esto se focalizará el estudio en dicha región.

### 2.2.2.5. Evolución de la superficie agrícola del tomate en la región de Valparaíso

Se presenta a continuación el comportamiento de la oferta de tomate en la región de Valparaíso mediante la evolución de la superficie agrícola del cultivo entre 2015 y 2024, la cual se puede observar en la Tabla 2.2 y el Gráfico 2.4.

Tabla 2.2 Superficie agrícola de tomate en la región de Valparaíso desde 2015 hasta 2024.

Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Hectáreas	857	911	901	1.003	1.020	1.044	977	1.197	1.231	1.375

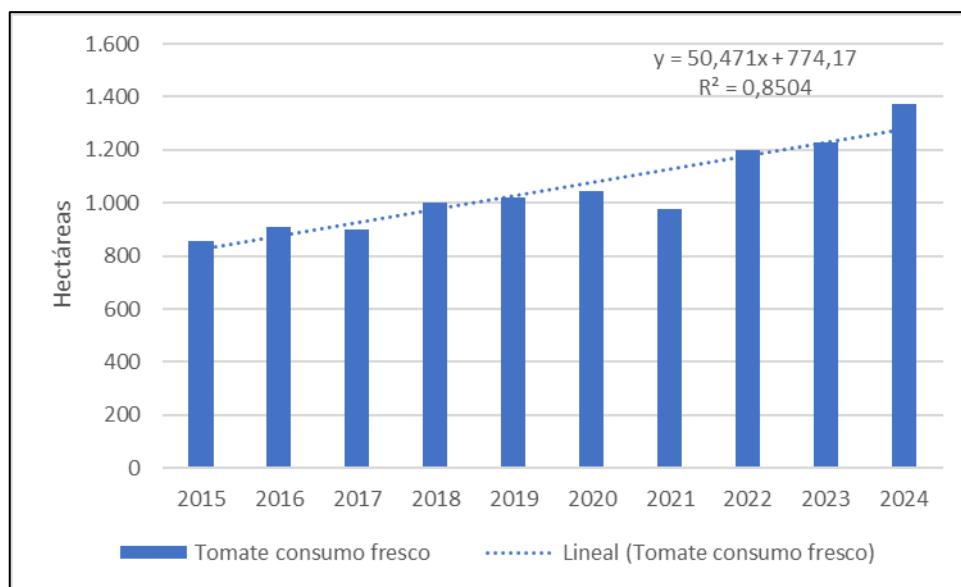


Gráfico 2.4 Superficie agrícola de tomate en la región de Valparaíso desde 2015 hasta 2024.

De los datos de la Tabla 2.2 se puede observar que el incremento de la superficie

agrícola de tomates el año 2024 fue de 60,5% con respecto al año 2015, en la región de Valparaíso.

Del Gráfico 2.4 se puede ver que el comportamiento de la expansión agrícola entre 2015 y 2024 es de tendencia lineal creciente, la cual presenta un buen ajuste con  $R^2 = 0,85$  y un incremento promedio anual de 50,4 hectáreas.

### **2.3. CICLOS DE CULTIVO**

Como se señaló en la subsección 2.2.2.3 el trabajo se va a focalizar en el cultivo del tomate debido a la importancia económica que tiene dentro del país.

La producción bajo invernadero permite producir fuera de temporada, lo que implica que es posible tener más de un ciclo de cultivo en un año. En general para determinar la cantidad la cantidad de ciclos de cultivo de cualquier especie de hortaliza es necesario conocer la duración de sus etapas de crecimiento, las cuales se pueden clasificar como etapa inicial, desarrollo, floración y maduración.

La etapa inicial consiste en el establecimiento de la plántula que pronto desarrollará sus primeras hojas verdaderas.

En la etapa de desarrollo la planta entra en una fase de intenso crecimiento vegetativo. Se caracteriza por la rápida expansión del follaje, el alargamiento del tallo principal y el desarrollo de un sistema radicular extenso.

La etapa de floración consiste en la transición de la fase vegetativa a la reproductiva, la cual se caracteriza por la aparición de racimos con flores. El factor crítico de esta etapa es una polinización efectiva.

La etapa de maduración comienza con el cuajado del fruto, donde el ovario fecundado se hincha para formar el fruto. Este experimenta luego un proceso de maduración caracterizado por cambios fisiológicos evidentes, el fruto pasa de ser un fruto inmaduro verde y duro a un estado de madurez comercial donde aparece el color característico, culminando en la madurez de consumo con su máximo contenido de azúcares, ácidos y compuestos volátiles.

A continuación, se presenta la duración de los estados fenológicos del tomate (Allen, et al., 2006).

Tabla 2.3 Duración en días de cada etapa fenológica del tomate.

Tipo de Zona	Inicial	Desarrollo	Floración	Maduración	Total
Mediterránea	30	40	45	30	145
Árida	30	40	40	25	135

Como el clima bajo invernadero recrea las condiciones de un clima mediterráneo, se puede establecer, de acuerdo con la Tabla 2.3, que el ciclo de cultivo del tomate será de 145 días, lo que significa un período de 5 meses aproximadamente. Por lo tanto, van a existir dos ciclos de cultivo para la producción de tomate bajo invernadero en un año, uno en la temporada de otoño-invierno y el otro en la temporada primavera-verano.

## **2.4. RENDIMIENTO POR PLANTA Y PRODUCCIÓN ANUAL**

Para determinar la producción anual del invernadero es necesario conocer la cantidad de ciclos de cultivo, la cantidad de plantas dentro del invernadero y el rendimiento por planta.

### **2.4.1. CANTIDAD DE PLANTAS DENTRO DEL INVERNADERO**

Para determinar la cantidad de plantas se requiere conocer la superficie del suelo del invernadero, la cantidad de camellones (amontonamiento de tierra en forma lineal), la cantidad de hileras por camellón y la cantidad de plantas por hilera.

Para el cultivo del tomate tutorados se deben construir camellones de plantación de un ancho de 0,6 a 0,7 [m], separados a una distancia igual a 0,6 [m], uno del otro, un pasillo principal de 1,5[m] y las plantas dentro de cada camellón deben estar separadas entre sí una distancia de 0,2 a 0,25 [m] (Lobos, et al., 2022).

A continuación, se presenta la superficie de un invernadero con sus camellones, hileras, pasillos y espaciamiento entre plantas.

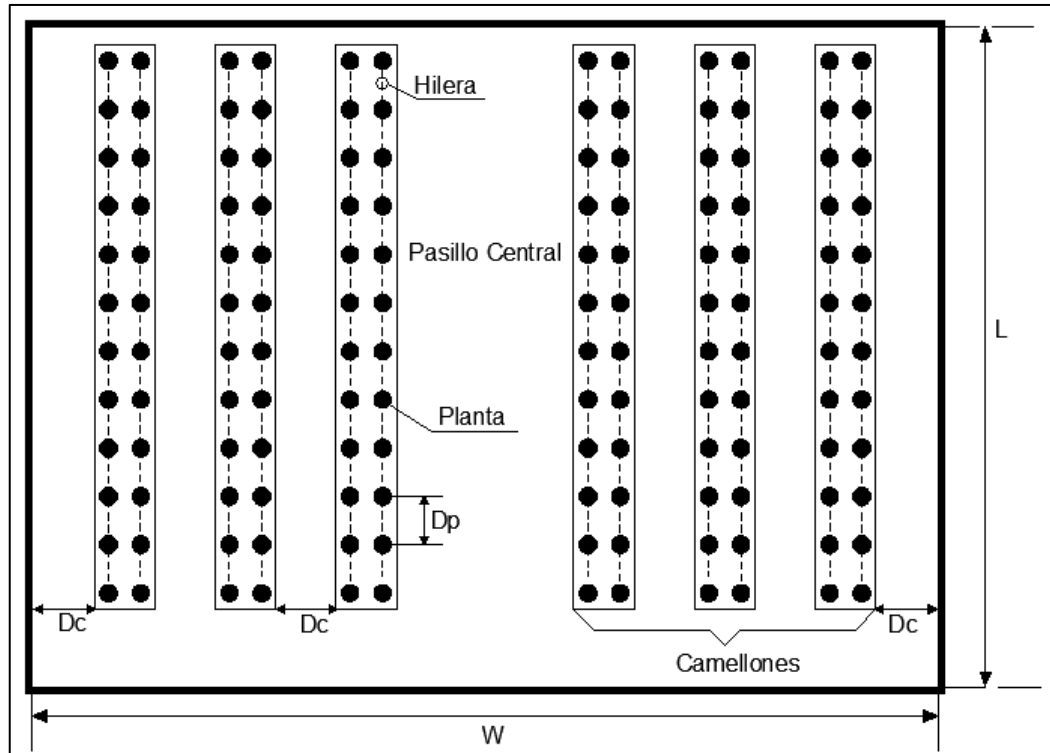


Figura 2.1 Distribución de camellones y plantas al interior del invernadero

Observando la Figura 2.1 se puede obtener la cantidad de camellones mediante la siguiente expresión.

$$N_c = \frac{W - 1,5}{D_c + W_c} \quad (2.1)$$

Donde:

- $N_c$ : Número de camellones
- $W$ : Ancho del invernadero [m]
- El pasillo central mide  $1,5$  metros de ancho
- $D_c$ : Distancia entre camellones [m]
- $W_c$ : Ancho de un camellón [m]

La cantidad de plantas sembradas en el invernadero se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$Np = Nh Nc \left( \frac{Lc}{Dp} + 1 \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- $Nh$ : cantidad de hileras por camellón
- $Lc$ : Largo del camellón [m]. (Para efectos de cálculo se puede estimar que  $Lc$  es aproximadamente igual a  $L$ )
- $Dp$ : Distancia entre plantas dentro de un camellón [m]

#### 2.4.2. RENDIMIENTO Y PRODUCCIÓN DEL INVERNADERO

El rendimiento del tomate bajo condiciones de invernadero es altamente variable, dependiendo primordialmente del nivel tecnológico y de manejo. En sistemas básicos, se pueden obtener rendimientos promedio de 3-8 [kg/planta], mientras que en sistemas semi tecnificados con manejo intensivo de variedades indeterminadas, los rendimientos oscilan entre 8-18 [kg/planta]. En invernaderos de alta tecnología con control climático computarizado, enriquecimiento de  $CO_2$  y manejo de precisión, es posible alcanzar valores superiores a [20-25] kg/planta (Peet & Welles, 2005).

El invernadero del presente estudio se puede catalogar como de semi tecnificado, debido a que considera control climático, pero no el control del  $CO_2$  y el uso de pantallas térmicas, por ejemplo.

Esto implica que la producción de tomates se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Prod = 2 Rend_p Np \quad (2.3)$$

Donde:

- Prod: Producción anual del invernadero [kg]

- El número 2 se refiere a la cantidad de ciclos de cultivo del tomate en el año
- Rend\_p: Rendimiento de la planta de tomate va entre 8-18 [kg/planta]

## **2.5. PEQUEÑA Y MEDIANA AGRICULTURA EN CHILE**

En el informe denominado Estudio de caracterización de la pequeña agricultura a partir del VII censo agropecuario y forestal, realizado por Qualitas Agroconsultores para el gobierno de Chile el año 2009, se realiza una clasificación de las explotaciones agrícolas en función del valor bruto de producción (VBP), en donde según lo establecido por el Sistema Público de Fomento, la pequeña explotación agrícola corresponde a lo que se denomina microempresa, la pequeña y mediana explotación agrícola a lo que se denomina pequeña empresa, y la gran explotación agrícola a lo que se denomina mediana y gran empresa, lo cual se puede visualizar en la Figura 2.2. Este ajuste de categorías se justifica por la diferencia de escala productiva y de capital que existe entre el sector agrícola y los otros sectores económicos.

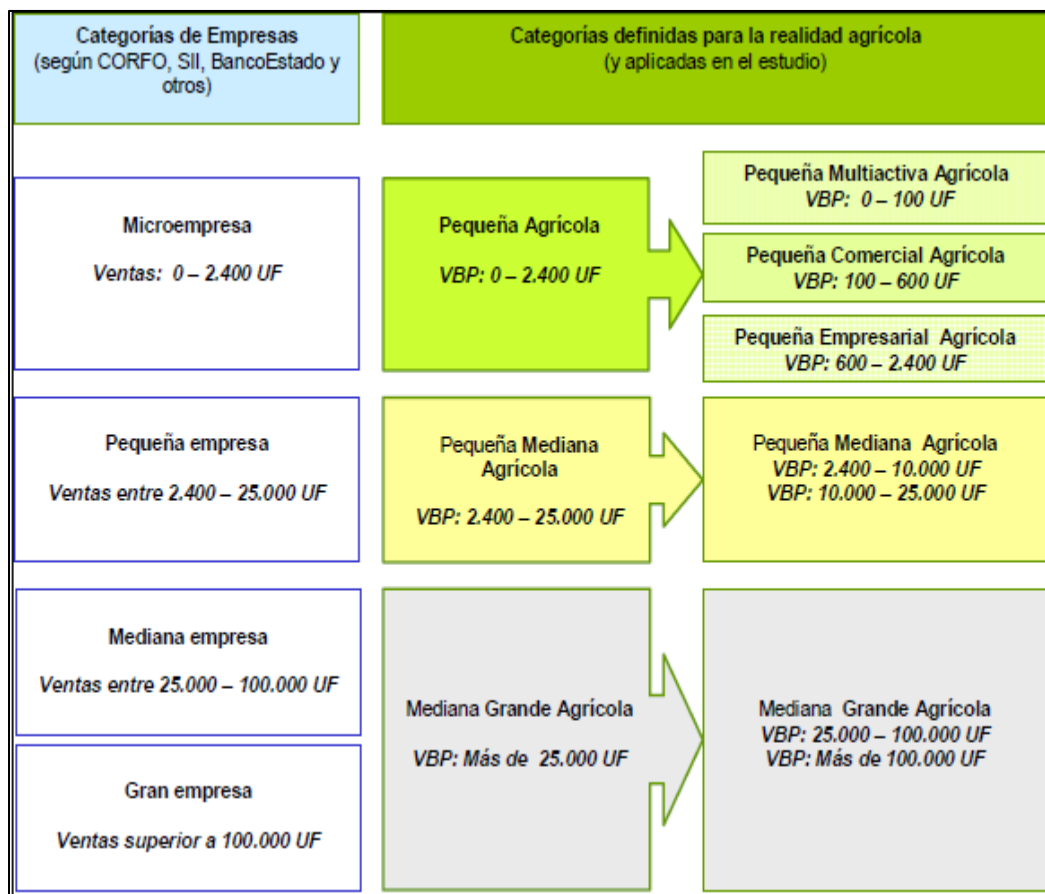


Figura 2.2 Clasificación de las empresas agrícolas según el VBP (Qualitas Agroconsultores, 2009)

En la Figura 2.2., se puede observar que el VBP de la Pequeña Mediana Explotación Agrícola, (2.400 – 24.000 UF), para efectos financieros corresponde al segmento de la Pequeña Empresa (Pequeña Empresa Agrícola en el presente caso).

Para construir un invernadero con climatización automatizada se requiere una alta inversión y altos gastos operacionales, con los cuales se logra incrementar la producción y los ingresos por venta o el VBP, por tanto, se debe analizar si dicha inversión logra incrementar convenientemente los beneficios obtenidos de la explotación agrícola del invernadero.

### 2.5.1. FINANCIAMIENTO DE LA PEQUEÑA EMPRESA AGRÍCOLA

Banco Estado tiene publicadas las tasas de interés anual para la Pequeña Empresa Agrícola, tal como se puede ver a continuación en la Tabla 2.4 (Banco Estado, 2024).

Tabla 2.4 Tasa de interés anual de créditos de Banco Estado para la Pequeña Empresa Agrícola.

<b>Créditos para la Pequeña Empresa Agrícola</b>			
	Tasa de interés anual		
		Desde 12 hasta 48 meses	
Monto del préstamo	Menor a 12 meses	Hasta UF 2.000	Mayor a UF 2.000
	6,10%	5,70%	6,10%

Como la inversión para un invernadero tecnificado con climatización automática y ERNC es alta, el plazo del crédito será de hasta 48 meses con una tasa de interés de 5,70% o 6,10% dependiendo del monto del crédito.

### 2.6. TIPOLOGÍA DE INVERNADEROS

Los invernaderos utilizados por la pequeña agricultura en Chile básicamente se clasifican según la tipología de su techo, en este sentido existen tres tipos de invernaderos; Dos Aguas (DA), Dos Aguas Modificado (DAM) y Curvo, tal como se puede ver a continuación en la Figura 2.3.

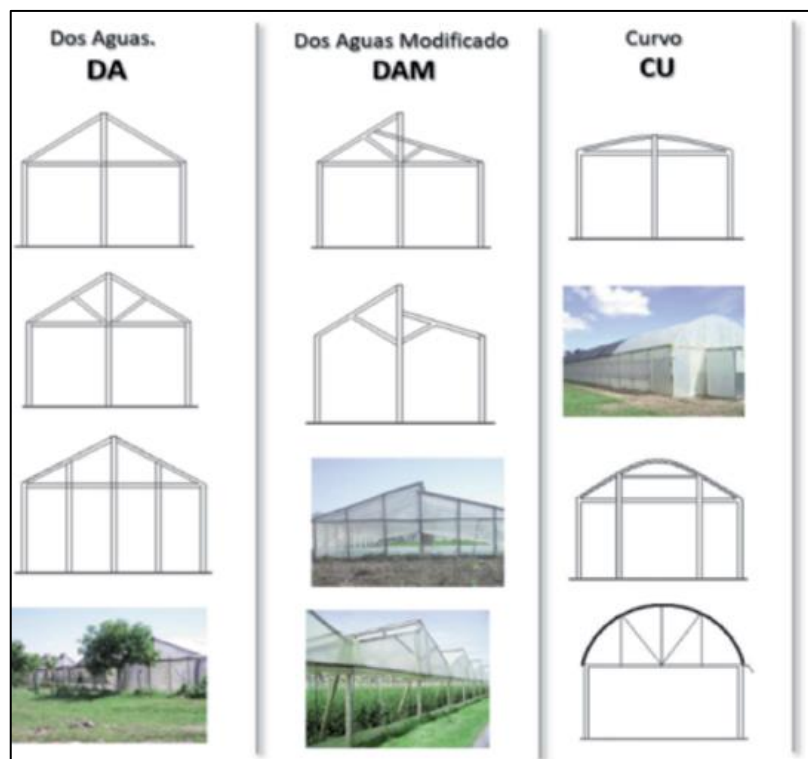


Figura 2.3 Tipos de invernaderos en la PYME agrícola de Chile (Ruiz & Martínez, 2020)

El invernadero tipo DAM es el que se utiliza en mayor proporción en la región de Valparaíso (Ruiz & Martínez, 2020). Este tipo de invernadero posee ventanas laterales por donde ingresa el aire exterior y una ventana cenital por donde sale el aire caliente y humedad, evitando de esta forma el estrés térmico en el cultivo. Dicha ventana cenital se ubica en la apertura generada por la diferencia de altura entre la cumbrera de ambas secciones del techo, tal como se puede ver a continuación en la Figura 2.4.

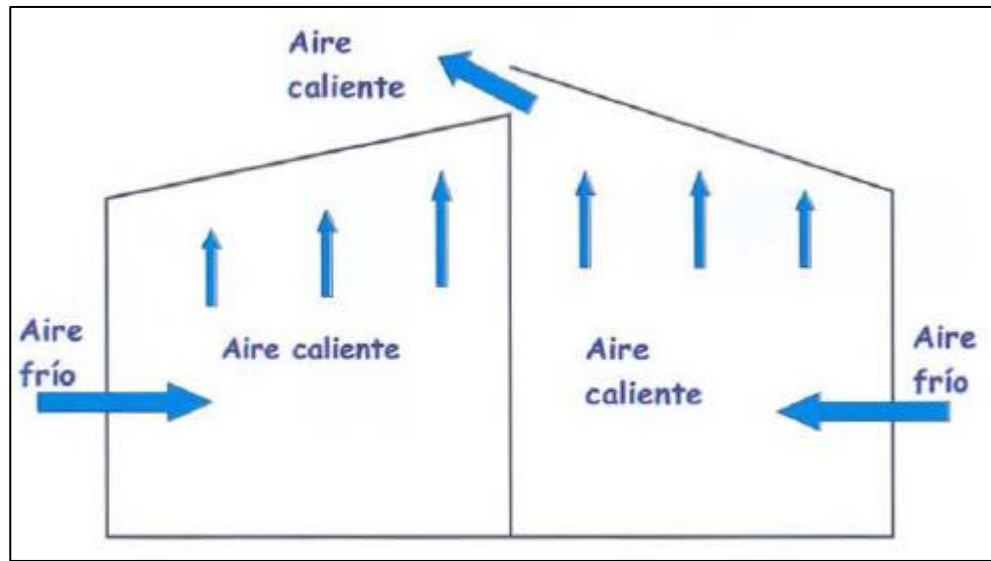


Figura 2.4 Ventilación pasiva invernadero tipo DAM (González A., 2004)

### 2.6.1. INVERNADERO MULTICAPILLA

Los invernaderos multicapilla están formados por varios módulos o invernaderos individuales que están conectados lateralmente entre sí, compartiendo las columnas o pilares de soporte, creando un espacio interior amplio y continuo. Estos invernaderos ofrecen múltiples ventajas operacionales que los posicionan como una opción preferente para producciones agrícolas de mediana y gran escala. Una de las principales ventajas radica en su capacidad para mantener niveles estables de temperatura y humedad a lo largo de toda la estructura, beneficiando significativamente el crecimiento uniforme de las plantas. Esta estabilidad climática se logra mediante el gran volumen interior que caracteriza a estas estructuras, el cual permite una mejor distribución del aire y una mayor inercia térmica que amortigua las fluctuaciones ambientales externas (NOVAGRIC, 2024).

Los invernaderos multicapilla se identifican por el techo de cada uno de sus módulos, de esta forma puede haber invernaderos multicapilla tipo DA, DAM y Curvo.

Como ejemplo se presenta a continuación en la Figura 2.5, un invernadero multicapilla con techo curvo.



Figura 2.5 Invernadero multicapilla con techo curvo. (Horticom, 2025)

## 2.7. DIMENSIONAMIENTO DE UN INVERNADERO TIPO DAM

Tal como se señaló en la sección 2.6., los invernaderos que se utilizan en mayor proporción dentro de la región de Valparaíso en la pequeña empresa agrícola son los de tipo Dos Aguas Modificado (DAM). Por tal motivo se presenta a continuación un invernadero multicapilla tipo DAM con cuatro módulos.

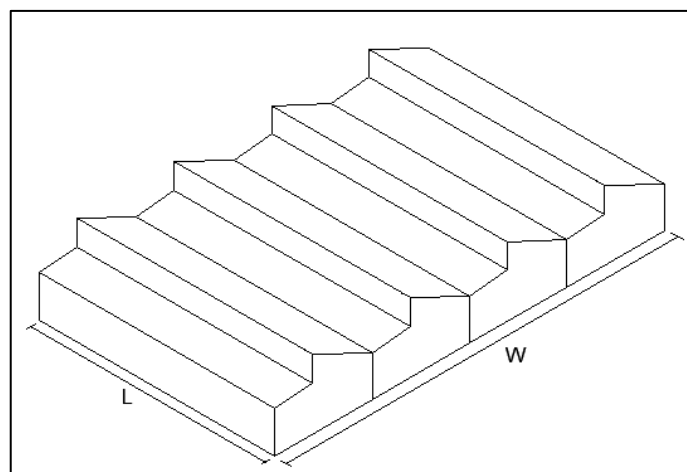


Figura 2.6 Invernadero multicapilla tipo DAM.

A continuación, se presentan las vistas de un módulo del invernadero multicapilla tipo DAM.

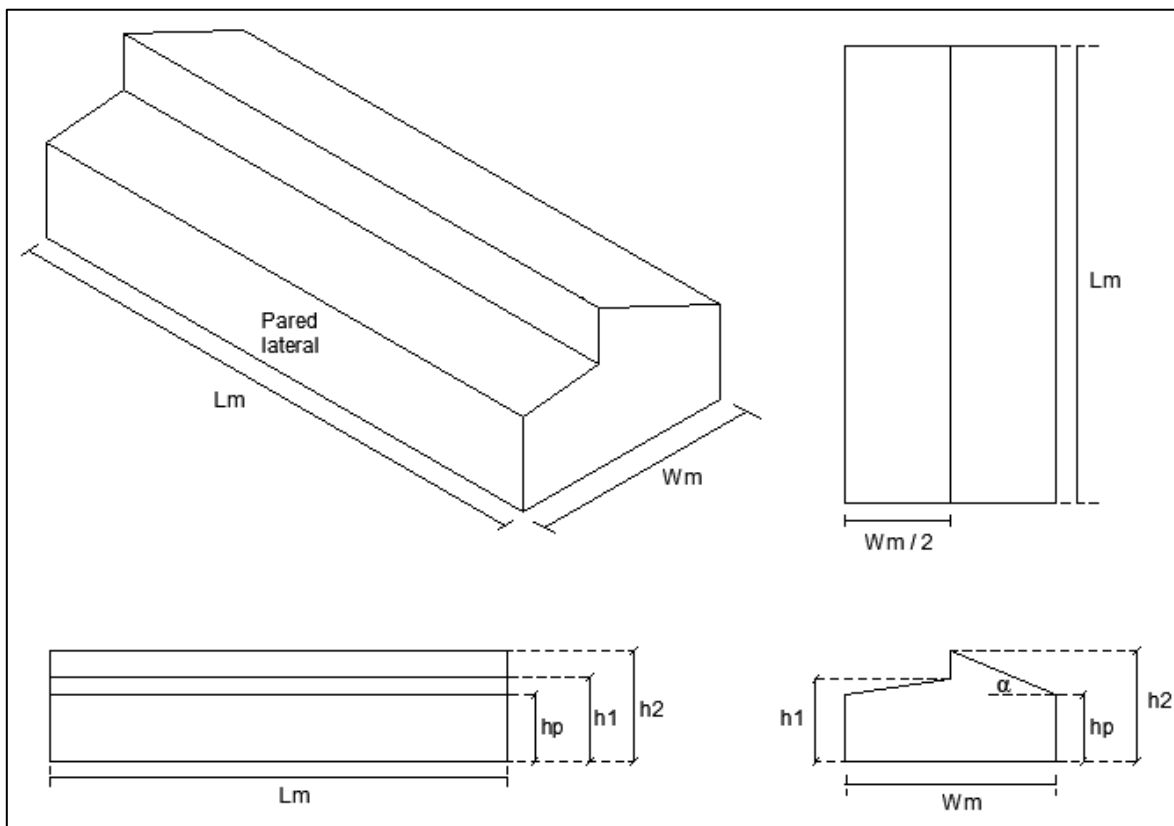


Figura 2.7 Vistas del módulo de un invernadero multicapilla tipo DAM.

Observando la Figura 2.7, los parámetros dimensionales del invernadero multicapilla y de cada módulo son los siguientes:

- $L_m$ : Largo del módulo
- $W_m$ : Ancho del módulo
- $Tg(\alpha)$ : Pendiente del agua del techo más inclinada
- $S_s$ : Superficie del suelo del invernadero multicapilla tipo DAM

Las variables dimensionales que se deben obtener para el invernadero multicapilla son las siguientes.

- $h_p$ : Altura de la pared lateral
- $h_1$ : Altura de la arista más elevada del agua del techo con menor inclinación.
- $h_2$ : Altura de la arista más elevada del agua del techo con pendiente  $Tg(\alpha)$ .
- $N$ : Cantidad de módulos
- $V$ : Volumen total del invernadero multicapilla

Además, se debe considerar que en cada pared lateral del módulo existe una ventana lateral enrollable y en el espacio que se forma entre la diferencia de  $h_2$  con  $h_1$  debe estar la ventana cenital enrollable de cada módulo. Las dimensiones de ambas ventanas son variables que se determinan de acuerdo con ciertos criterios preestablecidos para la construcción de invernaderos. Dichos criterios y el modelo de ecuaciones para obtener las variables dimensionales en función de los parámetros se encuentran en el Anexo A.

## **2.8. IDENTIFICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS SUPERFICIES DEL INVERNADERO**

Las superficies del módulo del invernadero tipo DAM se van a identificar tal como se muestra a continuación.

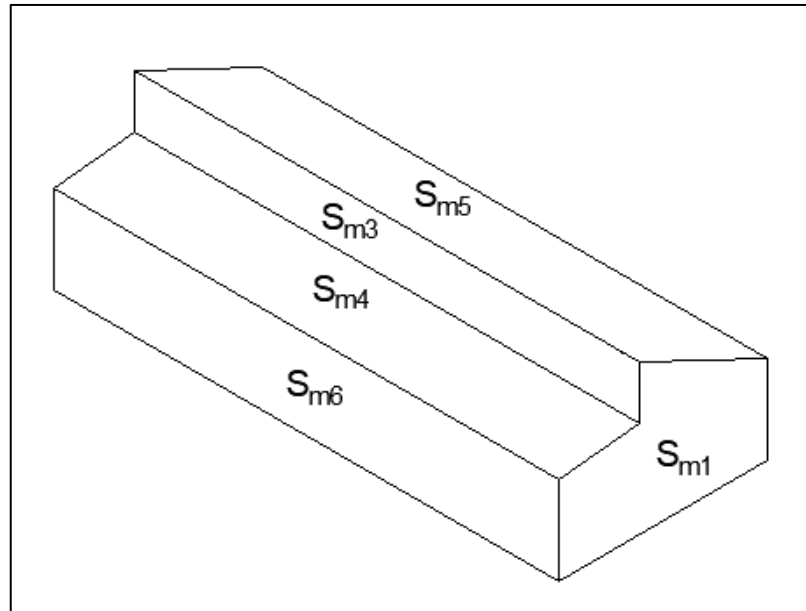


Figura 2.8 Superficies del módulo de un invernadero multicapilla tipo DAM

Observando la Figura 2.8, las superficies del módulo quedan definidas como sigue:

- $S_{m1}$ : Superficie Anterior
- $S_{m2}$ : Superficie Posterior
- $S_{m3}$ : Superficie Ventana Cenital
- $S_{m4}$ : Superficie agua menos inclinada del techo
- $S_{m5}$ : Superficie agua del techo más inclinada
- $S_{m6}$ : Pared lateral
- $S_{m7}$ : Pared lateral

Se puede establecer que un módulo del invernadero multicapilla tipo DAM tiene 7 superficies cada una definida como  $S_{m_j}$ , donde  $j = \{1, 2, 3, \dots, 7\}$

La magnitud de cada  $S_{m_j}$  se determina a partir de las dimensiones del invernadero definidas en la sección 2.7., tal como se puede ver en el Anexo B.

Ahora considerando que el invernadero multicapilla tipo DAM tiene N módulos, la

magnitud de las superficies receptoras de la radiación queda definida tal como se muestra a continuación.

$$S_j = N S_{m_j} ; \text{Para } j = \{1, 2, 3, 4, 5\} \quad (2.4)$$

y

$$S_j = S_{m_6} = S_{m_7} ; \text{Para } j = \{6, 7\} \quad (2.5)$$

Donde:

- $S_j$ : Superficie “j” del invernadero multicapilla tipo DAM.
- La superficie  $S_6$  y  $S_7$  corresponden a las paredes laterales de un módulo porque no se repiten  $N$  veces en el invernadero multicapilla.
- De acuerdo con lo anteriormente expuesto, por ejemplo,  $S_3$  corresponde a la suma de todas las superficies  $S_{m_3}$  de cada uno de los módulos que conforman el invernadero multicapilla tipo DAM.

Por otro lado, la superficie total de la cubierta del invernadero multicapilla se denomina superficie desarrollada, la cual se determina mediante la siguiente expresión.

$$S_d = \sum_{j=1}^{j=5} S_j \quad (2.6)$$

## 2.9. VENTANAS DEL INVERNADERO

La disposición de las ventanas en un módulo del invernadero tipo DAM se muestra a continuación.

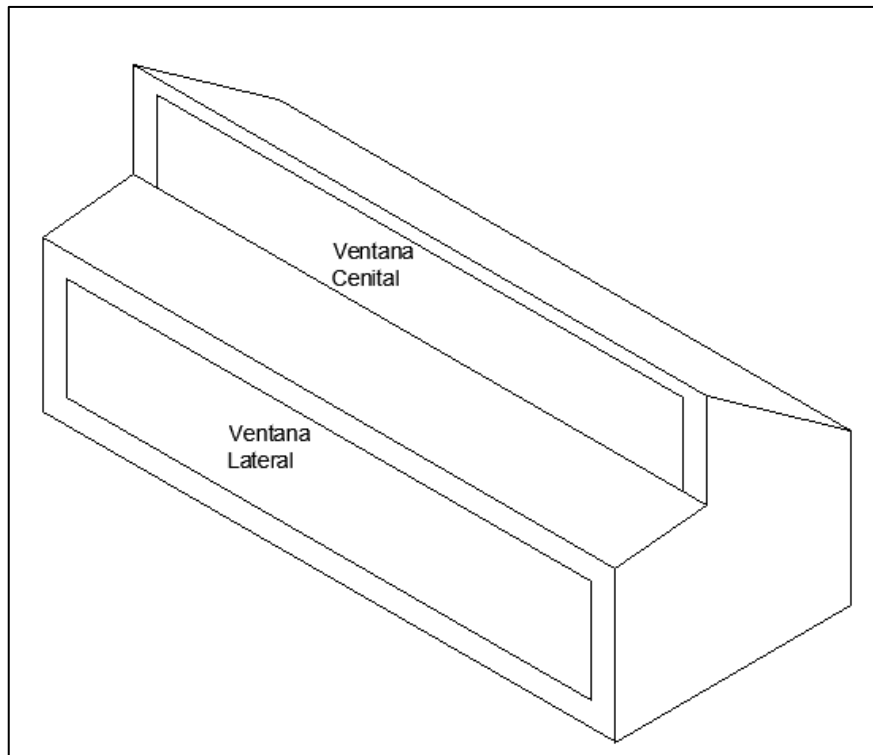


Figura 2.9 Vista esquemática de la disposición de ventanas en un módulo tipo DAM

El invernadero multicapilla tipo DAM de  $N$  módulos tendrá 2 ventanas laterales y  $N$  ventanas cenitales.

La ventana lateral y cenital serán enrollables con apertura y cierre automatizado de acuerdo con la temperatura y humedad del interior del invernadero.

En la parte interior de ambas ventanas debe haber una malla antiáfidos para proteger al cultivo cuando las ventanas se enrollen.

Una malla antiáfidos es un tejido sintético, generalmente hecho de monofilamento de polietileno de alta densidad, utilizado en agricultura protegida para cubrir invernaderos y proteger cultivos del ingreso de insectos pequeños como áfidos, moscas blancas y otras plagas dañinas. Estas mallas tienen un tejido denso que impide el paso de insectos, pero permite la circulación de aire y luz, mejorando el microclima y reduciendo el uso de pesticidas químicos (Teitel, 2007).

A continuación, se presenta una ilustración esquemática de la ventana lateral y cenital, dejando al descubierto la malla antiáfidos.

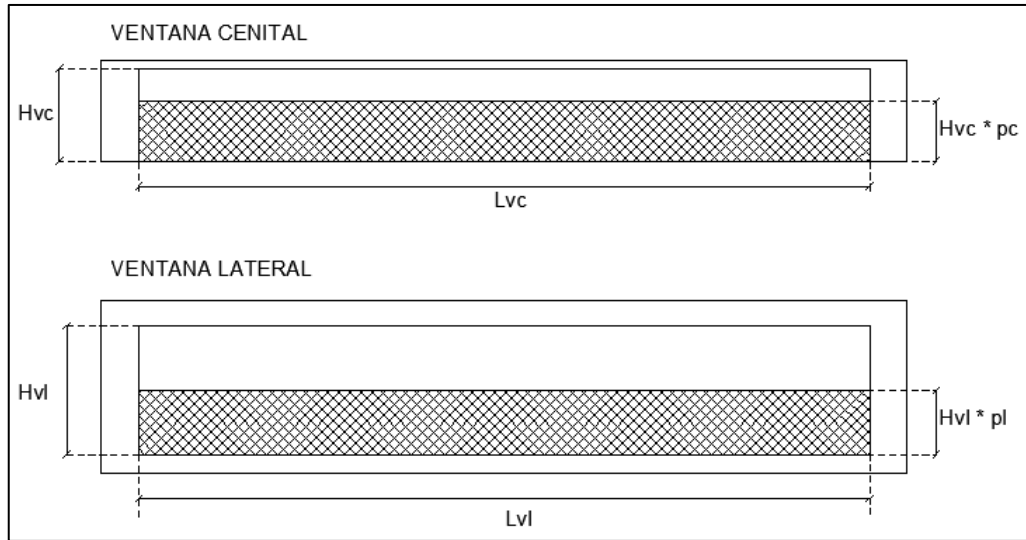


Figura 2.10 Vista esquemática frontal de las ventanas cenital y lateral del invernadero.

En la Figura 2.10, se puede ver que a medida que se enrolla la cubierta de PEBD de cualquiera de las ventanas, la altura de la apertura que deja al descubierto la malla antiáfidos va aumentando en un cierto porcentaje con respecto a la altura total de la ventana, lo que implica que el área de apertura o de la malla antiáfidos al descubierto también aumenta en dicho porcentaje.

A continuación, se presentan las expresiones para las superficies de apertura de las ventanas cenital y lateral.

$$Sv_{pl} = Lvl \ Hvl \ pl \quad (2.7)$$

$$Sv_{pc} = Lvc \ Hvc \ pc \quad (2.8)$$

Donde:

- $Sv_{pl}$ : Superficie de apertura de una ventana lateral de un módulo
- $Sv_{pc}$ : Superficie de apertura de la ventana cenital de un módulo
- $pl$ : Porcentaje de apertura de las ventanas laterales

- *pc*: Porcentaje de apertura de la ventana cenital

## 2.10. ORIENTACIÓN DEL INVERNADERO

El sol sale por el Este y durante el invierno pasa por el Norte con un ángulo de elevación bajo para esconderse por el Oeste. Lo que implica que la mejor orientación para el aprovechamiento de la luz solar en el periodo invernal sería Este – Oeste, es decir, que el largo del invernadero mire hacia el Norte, pero esta orientación es adecuada para cultivos bajos como la lechuga y la espinaca, pero no para cultivos que se guían en altura como el tomate o el pepino, ya que se sombrearían entre ellos. Para el caso de este último tipo de cultivos, es conveniente una orientación Norte-Sur.

También se debe considerar la dirección del viento predominante, para evitar que éste destruya la estructura, al respecto como el viento Norte predomina durante el otoño-invierno y el viento Sur durante el periodo primavera-verano, es recomendable que la orientación del invernadero sea Norte-Sur, no obstante, para aprovechar mejor la luz solar en invierno la mejor orientación sería Noroeste-Sureste, tal como se puede ver a continuación en la Figura 2.11.

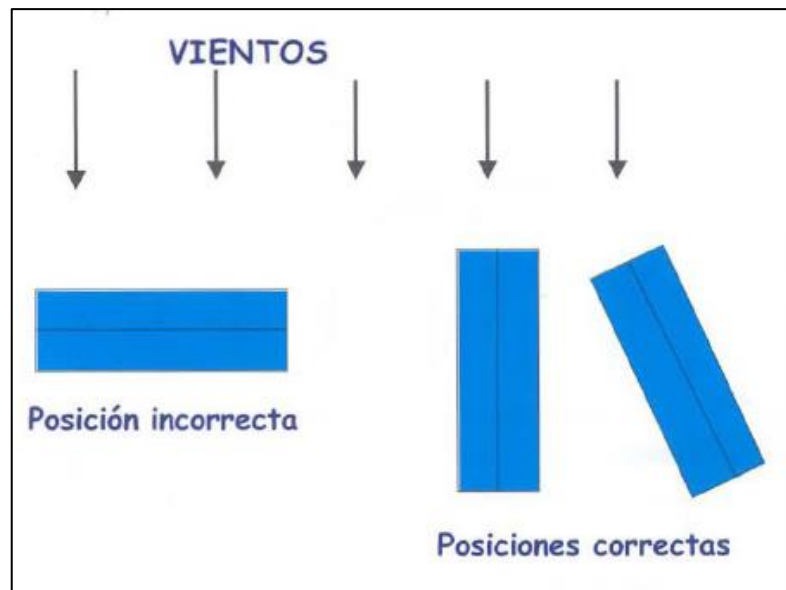


Figura 2.11 Orientación correcta respecto del viento (González A., 2004).

## 2.11. MATERIALES CONSTRUCTIVOS PARA UN INVERNADERO

La estructura del invernadero está compuesta por pilares, vigas, correas, que soportan el peso de la cubierta, el viento, la lluvia, los aparatos de medición climática y las sobrecargas de las instalaciones de riego y climatización.

Las estructuras de los invernaderos deben reunir las condiciones siguientes:

- Deben ser ligeras y resistentes.
- De material económico y de fácil conservación.
- Susceptibles de poder ser ampliadas.
- Que ocupen de forma óptima la superficie.
- Adaptables y modificables a los materiales de cubierta.

Los materiales más utilizados en la construcción de las estructuras de los invernaderos dependiendo de su uso son:

- En pilares, apoyos y refuerzos: madera, acero galvanizado, hierro y aluminio
- En correas y vigas: madera acero galvanizado, hierro y aluminio.
- Arcos: acero galvanizado o aluminio.
- Bases de cimentación: hormigón.
- En sujeción de la cubierta: alambre galvanizado o perfiles de acero galvanizado o aluminio, según el tipo de invernadero.
- Canales: en acero galvanizado o aluminio.

Con respecto a la cubierta, las propiedades más importantes que la definen son la transmisión de la radiación solar, la transparencia a la radiación infrarroja o térmica y la transmisión de calor de los materiales que la componen. Generalmente las cubiertas se realizan de los siguientes materiales; láminas plásticas de polietileno o cloruro de polivinilo, plásticos rígidos como el policarbonato y vidrio (NOVAGRIC, 2024).

En la pequeña y mediana empresa agrícola de Chile, el material más utilizado para la cubierta de los invernaderos es el polietileno de baja densidad (PEBD), en forma de

láminas plásticas. Esto se debe principalmente a su bajo costo, facilidad de instalación, disponibilidad en el mercado y propiedades de transmisión de radiación solar, que permiten un adecuado ingreso de luz para el crecimiento de los cultivos (López, 2025).

## **2.12. PARÁMETROS CLIMÁTICOS A CONTROLAR EN UN INVERNADERO**

Cada cultivo requiere de determinadas condiciones ambientales para poder desarrollarse en forma óptima, en este sentido el objetivo de un invernadero es poder entregar esas condiciones climáticas, controlando parámetros como la temperatura y la humedad, de tal forma de lograr mejorar el rendimiento y la calidad de las cosechas. Controlar el clima interno en un invernadero de forma óptima requiere de la utilización de sistemas de calefacción y refrigeración, especialmente en lugares donde las temperaturas altas y bajas están notoriamente fuera de los límites del rango óptimo para el cultivo.

Los sistemas de refrigeración y de calefacción para control climático en un invernadero determinan en gran parte su demanda energética, la cual se puede cuantificar mediante un balance de energía. Los principales parámetros climáticos que se consideran para realizar dicho balance son los siguientes (Valera, et al., 2008):

- Temperatura exterior
- Humedad exterior
- Radiación solar
- Dirección y velocidad media del viento

### **2.12.1. TEMPERATURA**

La temperatura del aire que se debe mantener dentro del invernadero depende del tipo de cultivo que se desarrolla en su interior y del estado fenológico de éste, tal como se puede ver a continuación en la Tabla 2.5 correspondiente a las temperaturas críticas y óptimas del tomate.

Tabla 2.5 Temperaturas críticas y óptimas del tomate (Tesi, 2001).

Temperatura	°C
Mínima letal	-2 - 0
Mínima Biológica	8 - 10
Máxima Biológica	26 - 30
Óptima Diurna	23 - 26
Óptima Nocturna	13 - 16

Estos valores sirven de base para establecer las temperaturas de funcionamiento del invernadero, lo cual permite calcular la potencia de diseño del sistema de calefacción y enfriamiento a través de un balance de energía.

Las necesidades energéticas del invernadero dependen fundamentalmente del salto térmico, es decir, de la diferencia entre la temperatura interior y exterior, por lo que en el diseño de los sistemas de climatización se deben considerar las condiciones de funcionamiento más restrictivas, esto implica que la calefacción se diseñará para satisfacer las necesidades de calor durante las noches invernales, por el contrario, los sistemas de refrigeración se diseñarán para poder mantener unas condiciones térmicas adecuadas para el desarrollo de las plantas durante el periodo diurno en la época estival (Valera, et al., 2008).

### 2.12.2. HUMEDAD

En general la interacción de la temperatura con la humedad tiene un gran impacto sobre el cultivo, por ejemplo, la combinación de altas temperaturas con humedad baja puede generar aborto floral y baja viabilidad del polen, por otro lado, humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades por hongos y bacterianas, además, dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta abortando parte de las flores, lo cual, también está vinculado al agrietamiento de fruto o “rajado” cuando se presenta un período de estrés hídrico y luego se produce un exceso de humedad en el suelo por riego abundante. En este sentido, es importante mantener un adecuado régimen higrométrico dentro del invernadero para evitar el estrés hídrico provocado cuando la humedad desciende demasiado, o la condensación de agua sobre el cultivo o la cubierta es excesiva. En el caso del cultivo del tomate la HR idónea está entre 60 y 80% (Allende, et al., 2017).

### **2.12.3. DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO**

La dirección y velocidad del viento influye en la ventilación natural del invernadero a través de sus ventanas, lo que es crucial para controlar el clima interior. Un viento moderado ayuda a remover el aire húmedo y caliente que se acumula en el interior del invernadero, disminuyendo la temperatura y la humedad, lo que reduce a su vez la incidencia de enfermedades fúngicas y mejora la calidad del cultivo. Además, permite la renovación del aire al interior, facilitando la entrada de dióxido de carbono necesario para la fotosíntesis (SensorGo, 2025).

### **2.12.4. RADIACIÓN**

La radiación solar es la fuente de energía usada por las plantas en el proceso de fotosíntesis, mediante el cual producen materia vegetal. La parte de la radiación solar que proviene directamente, en línea recta, desde el sol se denomina radiación directa y la radiación solar que proviene de diversas direcciones al haber sido reflejada y dispersada por la atmósfera, como por ejemplo las nubes, se denomina radiación difusa, la suma de ambas radiaciones conforman la radiación solar global (Hernández, et al, 2001).

Para calcular la radiación directa incidente se debe conocer el ángulo de incidencia y la radiación directa normal (Molina Monje & Martínez, 2017).

El ángulo de incidencia es el ángulo que forma el rayo solar con la normal a esa superficie en un momento determinado, de esta forma si la radiación directa incide en forma perpendicular a la superficie receptora, el ángulo de incidencia es igual a cero, en este sentido a medida que la radiación directa incide de forma más oblicua a la superficie receptora los ángulos de incidencia van aumentando su valor y la radiación incidente disminuye.

El otro tipo de radiación es la térmica, la cual es emitida por cualquier cuerpo con temperatura superior al cero absoluto, de esta forma, dicha radiación puede ser emitida, por ejemplo, desde el suelo, la cubierta y la atmósfera.

En un invernadero la radiación solar global y térmica es absorbida, reflejada y transmitida por la cubierta. La radiación que pasa a través de la cubierta y llega al interior del invernadero es absorbida en parte por el suelo y las plantas, la otra parte es reflejada por estas últimas hacia la atmosfera. La radiación solar que es absorbida, tanto por el suelo como por las plantas, se devuelve al invernadero como radiación térmica, lo cual permite que la

temperatura al interior del invernadero sea mayor a la temperatura exterior, incluso en los días nublados, siempre que no esté funcionando algún sistema de enfriamiento (Lobos Rodríguez, et al., 2022).

### 2.13. RADIACIÓN INCIDENTE

En base a lo expuesto en la sección 2.12.4 se establecen las siguientes ecuaciones para determinar la radiación directa, difusa y térmica que inciden en la cubierta y el suelo del invernadero.

La radiación solar global que incide sobre una superficie se puede expresar como la siguiente ecuación (Molina Monje & Martínez, 2017).

$$IG = IB + IDif \quad (2.9)$$

Donde:

- $IG$ : Irradiancia solar global incidente sobre una superficie [ $W m^{-2}$ ]
- $IB$ : Irradiancia solar directa incidente sobre una superficie [ $W m^{-2}$ ]
- $ID$ : Irradiancia solar difusa incidente sobre una superficie [ $W m^{-2}$ ]

La irradiación directa incidente está dada por la siguiente expresión (Molina Monje & Martínez, 2017):

$$IB = IBN \cos \theta \quad (2.10)$$

Donde:

- $IBN$ : Irradiancia solar directa normal [ $W m^{-2}$ ]
- $\theta$ : Ángulo de incidencia de la radiación directa normal sobre una superficie

En tanto que la irradiación difusa incidente se puede expresar de la siguiente forma (Molina Monje & Martínez, 2017).

$$ID = 0,5 DIFh (1 + \cos \beta) \quad (2.11)$$

Donde:

- $ID$ : Irradiancia difusa incidente [ $W m^{-2}$ ]
- $DIFh$ : Irradiancia difusa horizontal [ $W m^{-2}$ ], es la irradiancia sobre una superficie horizontal.
- $\beta$ : Ángulo de inclinación de una superficie con respecto a una superficie horizontal [rad]

La radiación térmica está determinada por la ecuación de Stefan-Boltzmann, la cual se expresa tal como se muestra a continuación.

$$IT = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.12)$$

Donde:

- $IT$ : Irradiancia térmica emitida y/o recibida [ $W m^{-2}$ ]
- $\varepsilon$ : Emisividad
- $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 * 10^{-8}$  [ $W m^{-2} K^{-4}$ ])
- $T$ : Temperatura del objeto emisor [K]

## 2.14. **ÁNGULO DE INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN DIRECTA**

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie es igual al ángulo formado entre el vector unitario de la posición del sol y el vector normal de la superficie receptora de dicha radiación.

A continuación, en la Figura 2.12 se puede visualizar el vector unitario de la posición del sol en el cielo ( $r$ ), el vector normal unitario ( $n$ ) de una superficie ( $S$ ) y el ángulo de incidencia ( $\theta$ ).

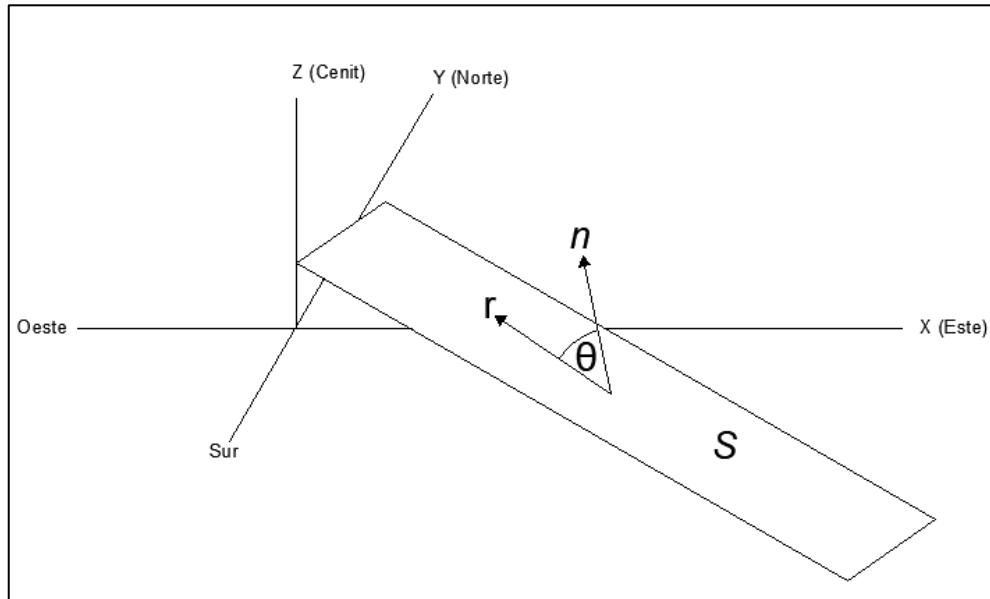


Figura 2.12 Ángulo de incidencia sobre una superficie

Observando la Figura 2.12, el ángulo de incidencia en la superficie (S) se determina mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \cos^{-1}(r \cdot n) \quad (2.13)$$

El cálculo del vector de la posición del Sol en el cielo se puede ver en Anexo C y el cálculo del vector normal unitario ( $n$ ) de la superficie de un módulo orientado en la dirección Noroeste – Sureste se puede ver en el Anexo D.

## **2.15. TRANSMISIVIDAD, REFLECTIVIDAD Y ABSORTIVIDAD EN UN INVERANDERO**

En el diseño y evaluación de cubiertas de invernaderos, como las fabricadas en polietileno, la interacción de la radiación solar con el material se describe mediante tres parámetros fundamentales: la transmisividad, la absorptividad y la reflectividad. La transmisividad es la fracción de la radiación incidente que atraviesa la lámina de polietileno y llega al interior del invernadero.

La absorptividad corresponde a la fracción de la radiación incidente que es absorbida por la cubierta y por el suelo del invernadero.

La reflectividad representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por la superficie del polietileno, reduciendo así la cantidad de radiación disponible para las plantas.

Los tres parámetros previamente descritos son adimensionales, con valores entre 0 y 1, y dependen de factores como la composición y aditivos del polietileno, el espesor de la lámina, el grado de degradación por exposición, la longitud de onda de la radiación y el ángulo de incidencia.

Por conservación de la energía la relación entre la transmisividad (T), la reflectividad (R) y la absorptividad (A) están dadas por la siguiente expresión (Duffie & Beckman, 2013), (Castellano & Russo, 2008).

$$T + R + A = 1 \quad (2.14)$$

### **2.15.1. TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA A LA RADIACIÓN DIRECTA.**

En caso de la radiación directa, la transmisividad además del material de la cubierta depende del ángulo de incidencia que forman los rayos solares con la línea perpendicular a las superficies de la cubierta. Cuanto mayor sea la perpendicularidad del rayo solar incidente de la radiación directa, mayor será la radiación transmitida. En este sentido, la geometría del invernadero y su orientación determinarán los ángulos de incidencia de la radiación solar directa sobre la cubierta (Hernández, et al., 2001).

A continuación, se presenta la relación gráfica entre la transmisividad a la radiación

directa para dos tipos de polietileno en función del ángulo de incidencia (Flores Ortega, et al., 2012).

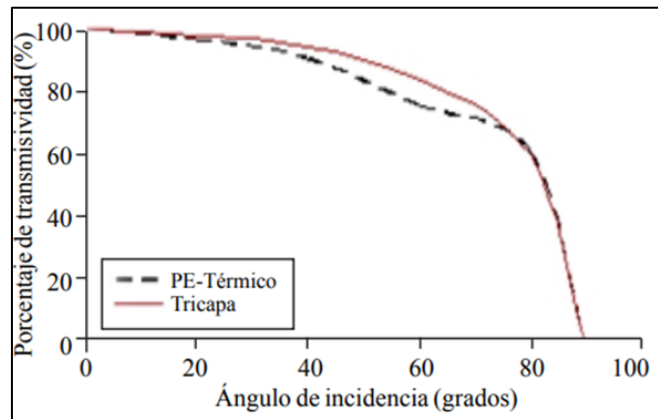


Figura 2.2.13 Transmisividad en función del ángulo de incidencia de la radiación directa.

Para calcular la transmisividad y la absorptividad a la radiación directa en cada superficie de la cubierta del invernadero en función del ángulo de incidencia se utilizan la ley de Snell, las ecuaciones de Fresnel, la ecuación del camino óptico interno y la ley de Beer-Lambert, las cuales se pueden ver en el Anexo E.

### **2.15.2. TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA A LA RADIACIÓN DIFUSA Y TÉRMICA**

La transmisividad a la radiación difusa que ingresa al invernadero no depende del ángulo de incidencia al provenir de todos lados del cielo (Hernández, et al., 2001).

Al llegar desde todos los ángulos, tiene un promedio de estos efectos. Una parte significativa de ella llega con ángulos de incidencia grandes, que son más propensos a la reflexión.

Los rayos solares de la radiación difusa que inciden con ángulos de incidencia grandes recorren un camino óptico más largo en promedio dentro del material lo que aumenta la probabilidad de absorción y dispersión interna.

En el presente estudio se consideran los valores de transmisividad y absorptividad a

la radiación difusa y térmica para el polietileno de baja densidad (PEBD) de 0,2 mm de espesor tabulados en el estudio de Valera, et al., (2008), los cuales se muestran a continuación.

- $T_{cd} = 0,88$ . Donde  $T_{cd}$  es la transmisividad a la radiación difusa de la cubierta
- $T_{ct} = 0,6$ . Donde  $T_{ct}$  es la transmisividad a la radiación térmica de la cubierta
- $A_{cd} = 0,03$ . Donde  $A_{cd}$  es la absorptividad a la radiación difusa de la cubierta
- $A_{ct} = 0,33$ . Donde  $A_{ct}$  es la absorptividad a la radiación térmica de la cubierta

### **2.15.3. TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA MALLA ANTIÁFIDOS**

La porosidad es una propiedad física crítica de las mallas antiáfidos que se define como la relación entre el área total de los espacios vacíos (poros) y el área total de la malla, generalmente expresada como un porcentaje (Teitel, 2007). La porosidad típica que puede utilizarse en un invernadero está entre 43% y 47% (Pérez Vega, et al., 2016), por tal motivo en el presente estudio se va a utilizar el valor promedio, es decir, una porosidad de 45%.

En invernaderos, las mallas antiáfidos blancas transparentes de porosidad en torno a 45% se caracterizan por presentar valores de transmisividad y absorptividad distintos según el tipo de radiación incidente. Para la radiación solar directa, la transmisividad en condiciones de incidencia normal está en el rango de 0,45 y 0,55, mientras que la absorptividad se sitúa entre 0,10 y 0,15. Estos valores varían con el ángulo de incidencia, ya que a mayor oblicuidad disminuye la radiación transmitida y aumenta la fracción absorbida o reflejada (Abdel-Ghany & Al-Helal, 2011; Abdel-Ghany, et al., 2015).

En el caso de la radiación solar difusa, que incide desde múltiples direcciones, la transmisividad efectiva se reduce a valores típicos de 0,30–0,45, mientras que la absorptividad puede aumentar levemente hasta rangos de 0,15–0,20, debido a que los rayos encuentran una mayor fracción de superficie de los hilos de la malla desde ángulos oblicuos (Al-Helal & Abdel-Ghany, 2010; Abdel-Ghany, et al., 2015)

Respecto a la radiación térmica de onda larga (4–50  $\mu\text{m}$ ), el polímero del que están fabricados los hilos de la malla es prácticamente opaco, por lo que la transmisividad es cercana a 0, mientras que la absorptividad está entre 0,70 y 0,90, con una emisividad semejante

de 0,85–0,95 (Abdel-Ghany, et al., 2015; Al-Helal & Abdel-Ghany, 2011)

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, por efectos prácticos, se tomarán los valores iguales o aproximados al promedio para la transmisividad y absorptividad a la radiación directa, difusa y térmica, tal como se muestra a continuación.

- $T_{mb} = 0,5$ ; Donde  $T_{mb}$  es la transmisividad a la radiación directa de la malla
- $T_{md} = 0,38$ ; Donde  $T_{md}$  es la transmisividad a la radiación difusa de la malla
- $T_{mt} = 0,05$ ; Donde  $T_{mt}$  es la transmisividad a la radiación térmica de la malla
- $A_{mb} = 0,12$ ; Donde  $A_{mb}$  es la absorptividad a la radiación directa de la malla
- $A_{md} = 0,17$  Donde  $A_{md}$  es la absorptividad a la radiación difusa de la malla
- $A_{mt} = 0,8$  Donde  $A_{mt}$  es la absorptividad a la radiación térmica de la malla

#### **2.15.4. ABSORTIVIDAD Y EMISIVIDAD DEL SUELO EN EL INVERNADERO**

Para calcular la absorptividad del suelo se requiere conocer la fracción de suelo cubierto por las plantas, la cual depende del índice de área foliar (IAF), del porcentaje de superficie conformada por los camellones dentro del invernadero y del porcentaje destinado a los pasillos de tierra entre los camellones.

El índice de área foliar es una medida adimensional que representa la cantidad total de área de las hojas de una planta o cultivo en relación con el área del suelo que cubren, éste índice va aumentando a medida que la planta va creciendo, de este modo el IAF tiene su valor mínimo en la etapa inicial y alcanza su valor máximo en la etapa de desarrollo y floración, para después volver a disminuir en su etapa de maduración.

Las ecuaciones para obtener la absorptividad y emisividad del suelo del invernadero para el cultivo de tomate se pueden ver en el Anexo F.

#### **2.16. BALANCE ENERGÉTICO DE UN INVERNADERO**

El objetivo del balance de energía es lograr determinar los flujos de calor que se pierden y ganan en el invernadero, para determinar los requerimientos energéticos para

calefacción o enfriamiento a suministrar por los sistemas de climatización.

Para que la temperatura interior del invernadero se mantenga en el valor predeterminado según los requerimientos del cultivo, el invernadero debe estar en estado estacionario. Si esta condición no se cumple debe aplicarse calefacción o enfriamiento para equilibrar los flujos de calor de entrada con los de salida.

A continuación, se presenta el balance de energía de un invernadero sin sistema de calefacción ni refrigeración, en estado estacionario (Valera, et al., 2008).

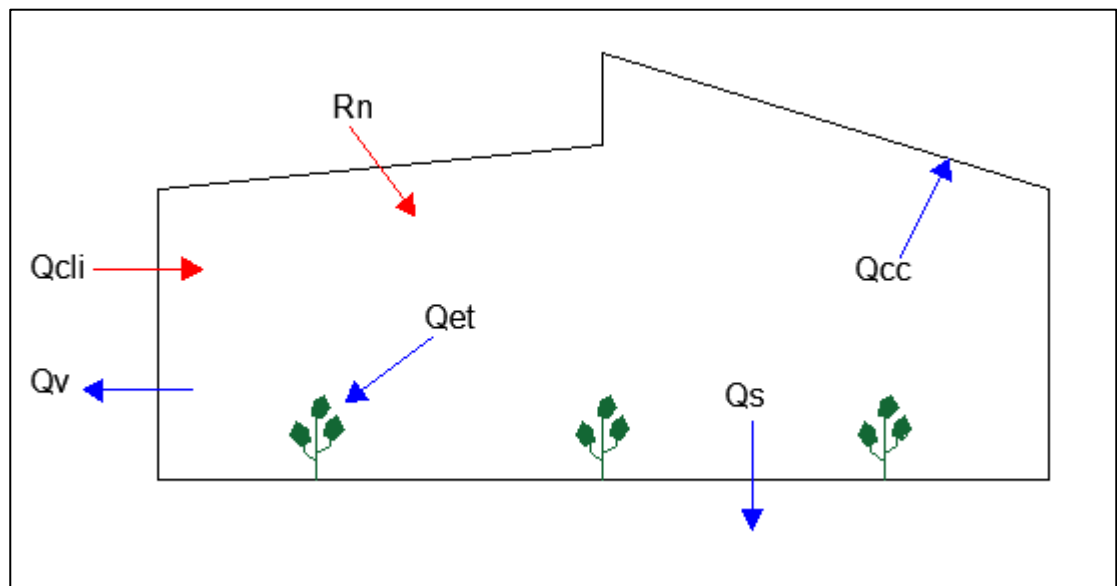


Figura 2.2.14 Balance de energía de invernadero en estado estacionario

En base a la Figura 2.14 se puede establecer el siguiente balance de energía para un estado estacionario

$$Q_{cli} = Q_{cc} + Q_v + Q_{et} + Q_s - R_n \quad (2.15)$$

Donde:

- $Q_{cli}$ : Transferencia de calor por climatización [kW]

- $Q_{cc}$ : Transferencia de calor por convección – conducción [kW]
- $Q_v$ : Transferencia de calor por ventilación [kW]
- $Q_{et}$ : Transferencia de calor por evapotranspiración [kW]
- $Q_s$ : Transferencia de calor a través del suelo [kW]
- $R_n$ : Radiación neta [kW]

Si  $Q_{cli} > 0$  significa que se debe incorporar calor al invernadero mediante el sistema de calefacción y si  $Q_{cli} < 0$  significa que se debe extraer calor del invernadero mediante el sistema de enfriamiento, de tal forma que el sistema esté en estado estacionario, con lo cual la temperatura interior puede mantenerse en el valor requerido.

Los cambios climáticos en el exterior como la temperatura, viento, humedad y radiación generan que las transferencias de calor,  $R_n$ ,  $Q_{cc}$ ,  $Q_v$ ,  $Q_{et}$  y  $Q_s$  vayan variando, lo que implica que  $Q_{cli}$  también va variando.

En las secciones que vienen a continuación se van a determinar las ecuaciones que modelan el balance de energía del invernadero.

## **2.17. NOMENCLATURA DE VARIABLES Y PARÁMETROS PARA EL BALANCE RADIATIVO**

En esta sección se va a presentar una tabla resumen de las variables y parámetros que se van a utilizar en el modelo correspondiente al balance radiativo del invernadero, como por ejemplo la irradiancia incidente y las propiedades ópticas de la cubierta, la malla antiáfidos y el suelo cubierto.

Tabla 2.6 Nomenclatura de variables y parámetros para realizar el balance radiativo

Tcb	Transmisividad de la cubierta a la radiación directa
Tcd	Transmisividad de la cubierta a la radiación difusa
Tct	Transmisividad de la cubierta a la radiación térmica
Tmb	Transmisividad de la malla antiáfidos a la radiación directa
Tmd	Transmisividad de la malla antiáfidos a la radiación difusa
Tmt	Transmisividad de la malla antiáfidos a la radiación térmica
Acb	Absortividad de la cubierta a la radiación directa
Acd	Absortividad de la cubierta a la radiación difusa
Act	Absortividad de la cubierta a la radiación térmica
Amb	Absortividad de la malla a la radiación directa
Amd	Absortividad de la malla a la radiación difusa
Amt	Absortividad de la malla a la radiación térmica
Asc_s	Absortividad del suelo cubierto a la radiación solar
Asc_l	Absortividad del suelo cubierto a la radiación térmica
Esc	Emisividad del suelo cubierto
S <sub>j</sub>	Superficie "j" del invernadero [m <sup>2</sup> ]
IB	Irradiancia solar directa sobre una superficie S <sub>j</sub> [W m <sup>-2</sup> ]
ID	Irradiancia solar difusa sobre una superficie S <sub>j</sub> [W m <sup>-2</sup> ]
IT	Irradiancia térmica sobre el invernadero [W m <sup>-2</sup> ]
θ	Ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie S <sub>j</sub>
β	Ángulo de inclinación de una superficie S <sub>j</sub> con respecto al suelo.

## 2.18. RADIACIÓN NETA

Para el cálculo del balance radiativo en el invernadero se establece que la radiación neta es igual a la energía solar y térmica absorbida por la cubierta, por el suelo y las plantas menos la radiación térmica emitida por el suelo y la cubierta.

A continuación, se presentan las ecuaciones que determinan la radiación neta sobre el invernadero.

$$Rn = B + D + RTn \quad (2.16)$$

$$B = Bc + Bs \quad (2.17)$$

$$D = Dc + Ds \quad (2.18)$$

$$RTn = RTc + RTs \quad (2.19)$$

Donde:

- $Rn$ : Radiación neta sobre el invernadero en [kW],
- $B$ : Radiación solar directa absorbida por la cubierta, la malla y el suelo del invernadero [kW]
- $D$ : Radiación solar directa absorbida por la cubierta, la malla y el suelo del invernadero [kW]
- $RTn$ : Radiación térmica neta en el invernadero [kW]
- $RTc$ : Radiación térmica absorbida y emitida por la cubierta, la malla invernadero [kW]
- $RTs$ : Radiación térmica absorbida y emitida por el suelo del invernadero [kW]
- Las letras c y s, de las variables en las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19), se refieren a la cubierta de polietileno (incluyendo la malla antiáfidos) y el suelo respectivamente.

Para disminuir la cantidad de términos en el cálculo de la radiación solar y térmica transmitida y absorbida se deja la superficie de apertura y la superficie cubierta de las ventanas como una fracción de la superficie desarrollada ( $S_d$ ), de tal forma que dicha fracción se obtiene de la siguiente forma:

$$f1 = \frac{Lvl \ Hvl \ pl}{Sd} \quad (2.20)$$

$$f2 = \frac{Lvl \ Hvl \ (1 - pl)}{Sd} \quad (2.21)$$

$$f3 = \frac{N \ Lvc \ Hvc \ pc}{Sd} \quad (2.22)$$

$$f4 = \frac{N \ Lvc \ Hvc \ (1 - pc)}{Sd} \quad (2.23)$$

$$f5 = 1 - (f1 + f2 + f3 + f4) \quad (2.24)$$

Donde:

- $f1$ : Proporción del área de apertura de las ventanas laterales con respecto a  $Sd$ .
- $f2$ : Proporción del área no abierta de las ventanas laterales con respecto a  $Sd$ .
- $f3$ : Proporción del área de apertura de las ventanas cenitales con respecto a  $Sd$ .
- $f4$ : Proporción del área no abierta de las ventanas cenitales con respecto a  $Sd$ .
- $f5$ : Proporción del área de la cubierta del invernadero que no es ventana con respecto a  $Sd$ .
- $Lvc$ ,  $Hvc$ ,  $Lvl$ ,  $Hvl$  están definidas en la sección 2.7 y corresponden al largo y alto de una ventana cenital y lateral respectivamente.

### **2.18.1. RADIACIÓN SOLAR DIRECTA ABSORBIDA POR LA CUBIERTA, LA MALLA Y EL SUELO**

La radiación solar directa ( $Bc_j$ ) absorbida por la superficie receptora ( $S_j$ ) queda definida mediante las siguientes ecuaciones.

Para  $j = 3$

$$Bc_j = IB \left[ \frac{Amb f3 Sd + (Acb + Tcb Amb) f4 Sd +}{+ Acb (S_j - N Lvc Hvc)} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.25)$$

Para  $j = 6$  y  $7$

$$Bc_j = IB \left[ \frac{Amb f1 Sd + (Acb + Tcb Amb) f2 Sd +}{+ Acb (S_j - Lvl Hvl)} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.26)$$

Para  $j = 1, 2, 4, 5$

$$Bc_j = IB S_j Acb \frac{1}{1000} \quad (2.27)$$

De tal forma que  $Bc$  es igual a siguiente expresión.

$$Bc = \sum_{j=1}^{j=7} Bc_j \quad (2.28)$$

La radiación solar directa absorbida por el suelo cubierto del invernadero ( $Bs$ ) queda definida mediante las siguientes ecuaciones.

Para  $j = 3$

$$Bs_j = IB Asc_s \left[ \frac{Tmb f3 Sd + Tcb Tmb f4 Sd +}{+ Tcb (S_j - N Hvc Lvc)} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.29)$$

Para  $j = 6$  y  $7$

$$Bs_j = IB Asc_s \left[ \frac{Tmb f1 Sd + Tcb Tmb f2 Sd +}{+ Tcb (S_j - Hvl Lvl)} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.30)$$

Para  $j = 1, 2, 4, 5$

$$B_{S_j} = I_B \frac{A_{sc\_s} \tau_{cb} S_j}{1000} \quad (2.31)$$

De tal forma que  $B_s$  es igual a siguiente expresión.

$$B_s = \sum_{j=1}^{j=7} B_{S_j} \quad (2.32)$$

Entonces la radiación directa absorbida por el invernadero está dada por la siguiente expresión.

$$B = B_c + B_s \quad (2.33)$$

Donde:

- $B_c$ : Radiación solar directa absorbida por la cubierta y la malla antiáfidos [kW]
- $B_s$ : Radiación solar directa absorbida por el suelo cubierto del invernadero [kW]

### 2.18.2. RADIACIÓN SOLAR DIFUSA ABSORBIDA POR LA CUBIERTA, LA MALLA Y EL SUELO

La radiación solar difusa ( $D_{c_j}$ ) absorbida por la superficie receptora ( $S_j$ ) queda definida mediante las siguientes ecuaciones.

Para  $j = 3$

$$D_{c_j} = I_D \left[ \frac{A_{md} f_3 S_d + (A_{cd} + \tau_{cd} A_{md}) f_4 S_d + A_{cd} (S_j - N_{hvc} L_{vc})}{1000} \right] \quad (2.34)$$

Para  $j = 6$  y  $7$

$$Dc_j = ID \left[ \begin{array}{l} Amd \ f1 \ Sd + (Acd + Tcd \ Amd) \ f2 \ Sd + \\ + Acd \ (S_j - N \ Hvc \ Lvc) \end{array} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.35)$$

Para  $j = 1, 2, 4, 5$

$$Dc_j = ID \ [Acd \ S_j] \frac{1}{1000} \quad (2.36)$$

De tal forma que  $Dc$  es igual a siguiente expresión.

$$Dc = \sum_{j=1}^{j=7} Dc_j \quad (2.37)$$

La radiación solar difusa absorbida por el suelo cubierto ( $Ds$ ) del invernadero queda definida mediante las siguientes ecuaciones.

Para  $j = 3$

$$Bs_j = ID \ Asc\_s \left[ \begin{array}{l} Tmd \ f3 \ Sd + Tcd \ Tmd \ f4 \ Sd + \\ + Tcd \ (S_j - N \ Hvc \ Lvc) \end{array} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.38)$$

Para  $j = 6$  y  $7$

$$Bs_j = ID \ Asc\_s \left[ \begin{array}{l} Tmd \ f1 \ Sd + Tcd \ Tmd \ f2 \ Sd + \\ + Tcd \ (S_j - Hvl \ Lvl) \end{array} \right] \frac{1}{1000} \quad (2.39)$$

Para  $j = 1, 2, 4, 5$

$$Ds_j = ID \ Asc\_s \ Tcd \ S_j \frac{1}{1000} \quad (2.40)$$

De tal forma que  $D_s$  es igual a siguiente expresión.

$$D_s = \sum_{j=1}^{j=7} D_{s_j} \quad (2.41)$$

Entonces la radiación directa absorbida por el invernadero está dada por la siguiente expresión.

$$D = D_c + D_s \quad (2.42)$$

Donde:

- $D_c$ : Radiación solar difusa absorbida por la cubierta y la malla antiáfidos [kW]
- $D_s$ : Radiación solar difusa absorbida por el suelo cubierto del invernadero [kW]

### 2.18.3. RADIACIÓN TÉRMICA ABSORBIDA POR LA CUBIERTA, LA MALLA Y EL SUELO DEL INVERNADERO

La radiación térmica neta sobre la cubierta y la malla antiáfidos se puede obtener mediante las siguientes ecuaciones.

$$RTc1 = E_{at} \sigma (T_{at})^4 S_d \left( \frac{(f1 + f3) Amt + (f2 + f4) (Act + Tct Amt) +}{+f5 Act} \right) \quad (2.43)$$

$$RTc2 = E_{sue} \sigma (T_{sue})^4 S_s \left( \frac{(f1 + f3) Amt + (f2 + f4) (Amt + Tmt Act) +}{f5 Act} \right) \quad (2.44)$$

$$RTc3 = -\sigma (T_{cub})^4 S_d \left( \frac{E_{mt} (f1 + f3) +}{+ (E_{mt} Tct + E_{ct}) (f2 + f4) + E_{ct} f5} \right) \quad (2.45)$$

$$RTc = \frac{1}{1000} (RTc1 + RTc2 + RTc3) \quad (2.46)$$

$$T_{cub} = \frac{1000 (Dc + Bc + RTc) + (hci Sd T_i + hce Sd T_e)}{(hci + hce) Sd} \quad (2.47)$$

La ecuación (2.47) proviene del balance de transferencia de calor realizado en la cubierta del invernadero.

El coeficiente de convección entre la cubierta y el interior se puede obtener mediante la siguiente expresión (Fatnassi, et al., 2013).

$$hci = 1,75 |T_{cub} - T_i|^{\frac{1}{3}} \quad (2.48)$$

El coeficiente de convección exterior para un invernadero con cubierta de polietileno se puede obtener utilizando la siguiente expresión (Garzoli, et al., 1987).

$$hce = 7,2 + 3,8 u \quad (2.49)$$

Donde:

- RTc1: Radiación térmica proveniente de la atmósfera y absorbida por la cubierta y la malla antiáfidos [W]
- RTc2: Radiación térmica proveniente del suelo del invernadero y absorbida por la cubierta y la malla antiáfidos [W]
- RTc3: Radiación térmica que es emitida hacia el exterior por la cubierta y por la malla antiáfidos [W]
- RTc: Radiación térmica neta sobre la cubierta del invernadero [kW]
- $E_{at}$ : Emisividad térmica de la atmósfera
- $E_{sue}$ : Emisividad térmica del suelo
- $T_{at}$ : Temperatura de la atmósfera [K]
- $T_{cub}$ : Temperatura de la cubierta y la malla antiáfidos [K]
- $T_{sue}$ : Temperatura del suelo [K]

- $T_i$ : temperatura interior [K]
- $T_e$ : Temperatura exterior [K]
- Emt: Emisividad de radiación térmica de la malla antiáfidos
- Ect: Emisividad de radiación térmica de la cubierta
- hci: Coeficiente de convección interior [ $W m^{-2} K$ ]
- hce: Coeficiente de convección exterior [ $W m^{-2} K$ ]
- u: Velocidad del viento exterior [ $m s^{-1}$ ]

Se establece que la temperatura del suelo ( $T_{sue}$ ) tiene 2 [K] menos que la temperatura interior del invernadero ( $T_i$ ).

La emisividad térmica de la atmósfera ( $E_{at}$ ), la temperatura de la atmósfera ( $T_{at}$ ) y la velocidad del viento (u), se pueden obtener mediante las ecuaciones del Anexo G.

La radiación térmica neta sobre el suelo se puede obtener mediante las siguientes ecuaciones basadas en el estudio de Reyes Rosas et al., (2017).

$$RTs1 = E_{at} \sigma (T_{at})^4 Sd \left( \begin{array}{l} (f1 + f3) Tmt + \\ + (f2 + f4) Tct Tmt + f5 Tct \end{array} \right) Asc_l \quad (2.50)$$

$$RTs2 = \sigma (T_{cub})^4 Sd \left( \begin{array}{l} Emt (f1 + f3) + \\ + (Ect Tmt + Emt) (f2 + f4) + Ect f5 \end{array} \right) Asc_l \quad (2.51)$$

$$RTs3 = -E_{sue} \sigma (T_{sue})^4 Ss \quad (2.52)$$

$$RTs = \frac{1}{1000} (RTs1 + RTs2 + RTs3) \quad (2.53)$$

Donde:

- RTs1: Radiación térmica emitida desde la atmósfera, transmitida a través de la cubierta y la malla y absorbida por el suelo [W]
- RTs2: Radiación térmica emitida desde la cubierta y la malla y absorbida por el

suelo [W]

- RTs3: Radiación térmica emitida desde el suelo [W]
- RTs: Radiación térmica neta sobre suelo [kW]

## 2.19. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN-CONDUCCIÓN

La transferencia de calor por conducción-convección entre el interior y el exterior del invernadero se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones (Valera, et al.,2008).

$$Q_{cc} = \frac{1}{1000} Sd K_{cc} (t_i - t_e) \quad (2.54)$$

$$K_{cc} = \left( \frac{1}{h_{ci}} + \frac{esp}{\lambda_c} + \frac{1}{h_{ce}} \right)^{-1} \quad (2.55)$$

Donde:

- $Q_{cc}$ : Pérdida de calor por convección conducción [kW]
- $K_{cc}$ : Coeficiente de pérdidas por conducción – convección [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $Sd$ : Superficie desarrollada de la cubierta del invernadero en [ $m^2$ ], la cual está especificada en la ecuación (3.6) de la sección 3.8.
- $t_i$ : Temperatura del aire interior en [ $^{\circ}C$ ]
- $t_e$ : Temperatura exterior del invernadero en [ $^{\circ}C$ ]
- $esp$ : Espesor del material de la cubierta en [m]
- $\lambda_c$ : Conductibilidad térmica del polietileno [ $W m^{-3} K^{-1}$ ]

El espesor de la cubierta de polietileno utilizados para invernaderos tiene un valor cercano a los 0,2 mm (Valera, et al., 2008).

## 2.20. PÉRDIDA DE CALOR POR EVAPOTRANSPIRACIÓN.

Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados que consisten en la pérdida del agua del cultivo a través de la superficie del suelo por evaporación (E) y por otro lado a través del proceso denominado transpiración (T), el cual consiste en la vaporización del agua contenida en los tejidos vegetales (Allen, et al., 2006).

El calor absorbido por la evapotranspiración del cultivo se expresa de la siguiente forma.

$$Q_{evp} = \frac{1}{3600} \frac{1}{1000} Ss \lambda_o ETc \quad (2.56)$$

Donde:

- $Q_{evp}$ : Pérdida de calor por evapotranspiración [kW]
- $\lambda_o$ : Calor latente de vaporización [ $J \text{ kg}^{-1}$ ]
- $ETc$ : Evapotranspiración de cultivo [ $\text{mm h}^{-1}$ ]
- $Ss$ : Superficie del suelo [ $\text{m}^2$ ]

El calor latente de vaporización se obtiene a partir de la ecuación (H.6) del Anexo H.

### 2.20.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE CULTIVO

La evapotranspiración de cultivo ( $ETc$ ) se define como el agua evapotranspirada por un cultivo creciendo en una superficie, bajo condiciones óptimas de suelo y agua, libre de enfermedades y que alcanza su producción potencial en un medio ambiente dado (Uribe, et al., 2019).

Para poder estimar la  $ETc$  se requiere conocer la evapotranspiración de referencia ( $ETo$ ) y el coeficiente de cultivo ( $Kc$ ), el cual se define como un factor que representa las condiciones de suelo y de la gestión del cultivo. Este factor está tabulado y varía según la etapa de crecimiento de las plantas (Allen, et al., 2006).

En términos prácticos la evapotranspiración de cultivo ( $ETc$ ) se utiliza para realizar

el cálculo de la demanda hídrica y calcular la pérdida de calor latente en el proceso de vaporización.

El valor de  $ET_c$  se obtiene mediante la siguiente expresión (Allen, et al., 2006).

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2.57)$$

La unidad de medida de  $ET_c$  es igual a  $[\text{mm h}^{-1}]$  o  $[\text{mm día}^{-1}]$ . Esta unidad de medida es equivalente a  $[\text{l h}^{-1} \text{ m}^{-2}]$  o  $[\text{l h}^{-1} \text{ m}^2]$ .

Los valores de  $K_c$  para el tomate, según su etapa de crecimiento, se presentan a continuación (Allen, et al., 2006).

Tabla 2.7 Coeficiente de cultivo del tomate según la etapa de crecimiento

Etapa de crecimiento	$K_c$
Inicial	0,6
Desarrollo	1,15
Floración	1,15
Maduración	0,8

### 2.20.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

La evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) se puede definir como la evapotranspiración generada desde un suelo cubierto por completo de pasto sobre el cual no hay restricción de agua. Esto implica que la  $ET_o$  no depende de los factores de suelo, sino que sólo depende de factores climáticos presentes en el lugar.

El método para realizar el cálculo de la  $ET_o$  se encuentra en el Anexo H.

### 2.21. PÉRDIDAS DE CALOR POR VENTILACIÓN

Los flujos de entrada o salida de aire a través del invernadero generan un cambio en la temperatura, vapor de agua y anhídrido carbónico dentro de éste.

Se puede expresar la pérdida de calor sensible y latente debida a la renovación del

aire interior mediante las siguientes ecuaciones (Valera, et al., 2008).

$$Q_{vs} = G \rho [C_{pa} (t_i - t_e) + C_{pv} (x_i t_i - x_e t_e)] \quad (2.58)$$

$$Q_{vl} = G \rho \lambda_o (x_i - x_e) \quad (2.59)$$

$$Q_v = Q_{vs} + Q_{vl} \quad (2.60)$$

Donde:

- $Q_{vs}$ : Transferencia de calor sensible debido a la ventilación [kW]
- $Q_{vl}$ : Transferencia de calor latente debido a la ventilación [kW]
- $G$ : Caudal de aire debido a la ventilación natural [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]
- $\rho$ : Densidad del aire del invernadero [ $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ]
- $C_{pa}$ : Calor específico del aire [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
- $C_{pv}$ : Calor del vapor recalentado en [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
- $x_i$ : Humedad absoluta interior en [ $\text{kg kg}^{-1}$ ]
- $x_e$ : Humedad absoluta exterior en [ $\text{kg kg}^{-1}$ ]
- $\lambda_o$ : Calor latente de vaporización en [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

Las ecuaciones para el cálculo del caudal de aire debido a la ventilación natural ( $G$ ), de la densidad del aire ( $\rho$ ) y de la humedad absoluta ( $x$ ) se puede ver en el Anexo I y el cálculo del calor latente de vaporización ( $\lambda_o$ ) se puede ver en la ecuación (H.6) del anexo H.

Por otro lado, en el estudio de Valera et al., (2008) se determina que el valor del calor específico del aire ( $C_{pa}$ ) y el calor específico del calor recalentado ( $C_{pv}$ ) es igual a 1007 [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ] y 1875 [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ], respectivamente.

## 2.22. PÉRDIDA DE CALOR A TRAVÉS DEL SUELO

La pérdida de calor a través del suelo ( $Q_s$ ) depende si es de día o es de noche y está

determinada por la siguiente expresión (Guevara, 2006).

$$Q_s = 0,1 Rn; \text{ En horas diurnas} \quad (2.61)$$

$$Q_s = 0,5 Rn; \text{ En horas nocturnas} \quad (2.62)$$

## **2.23. SISTEMA DE CALEFACCIÓN**

Los sistemas de calefacción en invernaderos tienen como objetivo mantener condiciones térmicas óptimas para el crecimiento de los cultivos, especialmente en periodos o regiones de bajas temperaturas. En general, existen dos tipos principales de sistemas de calefacción, el sistema de calefacción por aire y el sistema de calefacción por agua.

### **2.23.1. SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR AIRE**

Este sistema funciona mediante el calentamiento del aire por contacto directo con los productos de combustión y se distribuye desde el quemador hasta el invernadero por una serie de conductos, generando gradientes de temperatura horizontales y verticales; el gradiente vertical está comprendido entre 2° y 3° C por cada metro de altura y por tanto la temperatura cerca del techo puede ser de 5 a 10° C superior a la temperatura en la zona del cultivo.

Las tuberías de plástico van tendidas sobre el suelo, pero dependiendo del tipo de cultivo, podría ser mejor colocar los conductos de aire sobre las plantas, por ejemplo, a 1,75 o 2 metros de altura.

La diferencia en temperaturas entre la zona próxima al quemador y el otro extremo del invernadero es menor si se usan tuberías perforadas de PE para distribuir el aire. Para mejorar la uniformidad, el diámetro de las perforaciones debe aumentarse en proporción a la distancia del quemador o del conducto principal.

Los conductos de plástico son ligeros, flexibles, fáciles de instalar y pueden fijarse en la posición que más le convenga al cultivo. Al final del período de calefacción pueden enrollarse y almacenarse. Para mejorar su eficacia y al mismo tiempo calentar el suelo, los conductos deben apoyarse en el suelo con los orificios de salida de aire apuntando hacia

abajo. Debe ponerse cuidado en no exponer a las plantas a la corriente de aire caliente descargada por el sistema de calefacción. El mezclar el aire caliente con el aire del invernadero elimina cualquier tipo de riesgo.

Este sistema es útil tanto para un apoyo térmico temporal o para aumentar la temperatura del invernadero varios grados por encima de la exterior, de una manera continua. Tiene el efecto secundario de aumentar la evaporación y la dificultad en controlar el dióxido de carbono, puesto que aumenta considerablemente el movimiento de aire, en este sentido se aconseja que la velocidad del aire sea inferior a 5 m/s.

Este sistema económico funciona con cualquier tipo de combustible, ya sea carbón, diésel, o gas natural y se adapta tanto a invernaderos grandes con una caldera central e intercambiadores de calor locales como a invernaderos pequeños con quemadores individuales (Plant Production and Protection Division, 2002).

### **2.23.2. SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR AGUA**

El sistema de calefacción por agua caliente en invernaderos se basa en la circulación de agua calentada a través de tuberías dispuestas en el interior del recinto. El agua se calienta mediante calderas, que pueden utilizar gas, petróleo o biomasa como energía, y posteriormente se distribuye a través de una red cerrada de tuberías, con el fin de liberar calor por convección y radiación al aire y a la superficie del suelo donde están las plantas.

Los componentes principales de un sistema de calefacción por agua caliente son:

- Caldera: equipo encargado de calentar el agua hasta temperaturas que suelen variar entre 70 °C y 90 °C.
- Tuberías de distribución: generalmente de acero, polietileno de alta densidad o polipropileno. Se instalan en el perímetro o entre los camellones del cultivo.
- Bombas de circulación: impulsan el agua caliente a través de la red, garantizando un flujo uniforme.
- Válvulas y controles: regulan caudal, presión y temperatura, pudiendo incluir sistemas de automatización vinculados a sensores ambientales.

Las formas de distribución del calor en la calefacción por agua son las siguientes:

- Tuberías en el suelo: Estas tuberías se instalan a lo largo de los pasillos o alrededor de los camellones del cultivo, para de esta forma aportar calor principalmente al aire cercano a las plantas.
- Tuberías alrededor de las hojas: Estas tuberías se colocan en altura alrededor de la planta mejorando con ello la temperatura en la zona de cultivo y reducen la humedad relativa al favorecer la circulación de aire caliente.

Las ventajas de un sistema de calefacción por agua caliente consisten principalmente en proporcionar una distribución homogénea del calor en el invernadero y permitir un control preciso de la temperatura mediante termostatos y automatización.

La desventaja principal del sistema de calefacción por agua caliente es de tipo económico, ya que requiere una inversión inicial alta en la caldera, tuberías y sistemas de control.

Para calentar el suelo se puede utilizar agua entre 30° y 40°C y por tanto en este caso es factible la aplicación de energías renovables como la geotérmica, calor residual industrial y solar de baja temperatura mediante colectores solares (Plant Production and Protection Division, 2002).

## **2.24. DISEÑO DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN POR AGUA**

En base a lo descrito en la sección anterior, se presenta a continuación, un diagrama esquemático de la distribución de las tuberías alrededor de un cultivo, donde se puede ver el flujo de agua a través éstas y las válvulas.

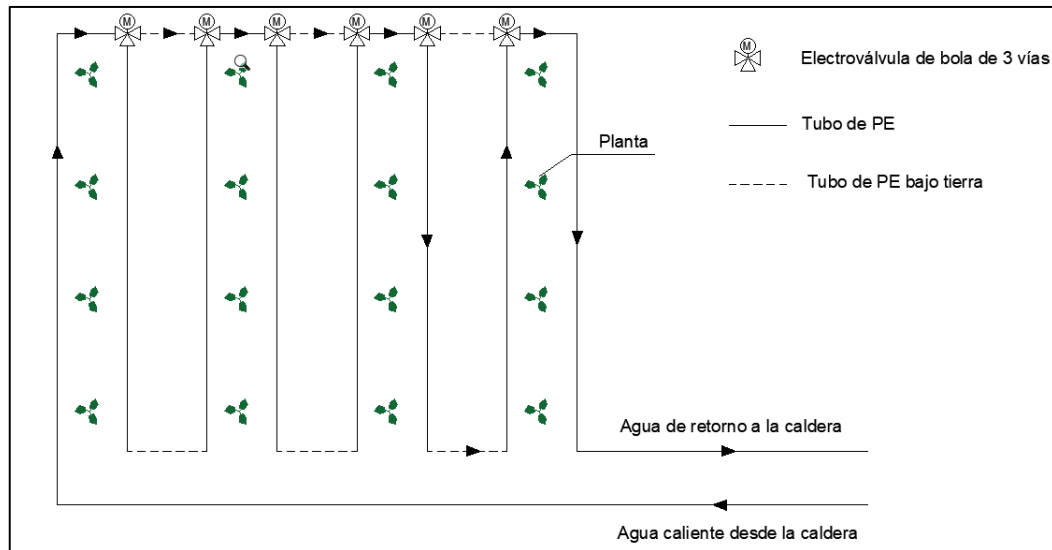


Figura 2.15 Diagrama esquemático de la distribución del sistema de calefacción por agua caliente.

En el caso de la Figura 2.15 se puede ver que la distribución del sistema de tubería tiene la forma de un zigzag con 4 vueltas alrededor de las plantas y electroválvulas de 3 vías por donde se conecta un bypass entre cada vuelta para acortar el largo de la tubería según los requerimientos de la potencia de calefacción que se deba transferir al invernadero. Estos bypass salen de una electroválvula y pasan bajo tierra hacia la siguiente vuelta del zigzag donde se conectan a otra electroválvula. Además, se establece que la tubería que completa una vuelta alrededor de las plantas debe seguir su recorrido atravesando el pasillo hacia la otra vuelta bajo tierra a una profundidad de 5 a 10 centímetros, para facilitar el tránsito de los operarios y maquinaria.

A continuación, se muestra esquemáticamente una vista transversal de un camellón, donde se puede ver la tubería que pasa alrededor de las plantas.

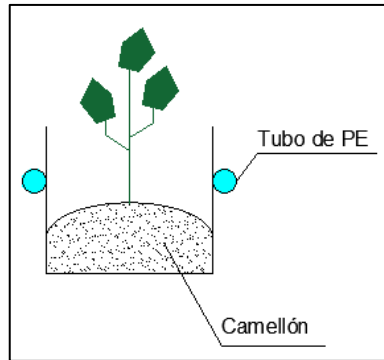


Figura 2.16 Vista trasversal de un camellón con un tubo de PE alrededor de las plantas

Se establece que la tubería va a ir apoyada en un soporte alrededor de 5 a 10 centímetros por sobre el camellón.

### 2.24.1. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TUBERÍAS

El dimensionamiento del largo y diámetro de la tubería de calefacción se realiza mediante las siguientes expresiones (Valera, et al., 2008).

$$L_{tub} = Q_{cal} 1000 \frac{1}{\pi D (qc + qr)} \quad (2.63)$$

$$qc = h_0 (T_0 - T_i) \quad (2.64)$$

$$T_0 = \frac{(T_{in} + T_{out})}{2} \quad (2.65)$$

$$qr = \sigma 0,95 (T_0^4 - T_i^4) \quad (2.66)$$

$$h_0 = 1,32 \left( \frac{T_0 - T_i}{D} \right)^{0,25} \quad (2.67)$$

Donde:

- $L_{tub}$ : Largo total de la tubería de calefacción [m]
- $Q_{cal}$ : Potencia de calefacción que debe suministrar el sistema de tuberías [kW]
- $q_c$ : Calor transferido por convección a través de la tubería [ $W m^{-2}$ ]
- $q_r$ : Calor transferido por radiación a través de la tubería [ $W m^{-2}$ ]
- $h_0$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $T_0$ : Temperatura media [K]
- $T_i$ : Temperatura interior del invernadero [K]
- $T_{in}$ : Temperatura a la entrada del sistema de tuberías [K]
- $T_{out}$ : Temperatura a la salida del sistema de tuberías [K]
- $D$ : Diámetro exterior de la tubería [m]

$$FM = Q_{cal} 1000 \frac{1}{C_w (T_{in} - T_{out})} \quad (2.68)$$

Donde:

- $FM$ : Flujo másico del agua a través de las tuberías [ $kg s^{-1}$ ]
- $Q_{cal}$ : Potencia de calefacción que debe suministrar el sistema de tuberías [kW]
- $C_w$ : Calor específico del agua [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]

Como 1 litro de agua pesa 1 kilogramo, entonces el caudal o flujo volumétrico del agua (FV) en [ $m^3 s^{-1}$ ] se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$FV = FM \frac{1}{1000} \quad (2.69)$$

La dimensión del diámetro está determinada por el valor admisible de la velocidad del agua ( $v_w$ ) dentro de la tubería, la cual debe estar entre 0,5 y 3 [ $m s^{-1}$ ].

$$v_w = \frac{4 FV}{\pi D^2} \quad (2.70)$$

El número de vueltas ( $N_v$ ) en la disposición en zigzag que tienen las tuberías alrededor de los camellones se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$N_v = \frac{L_{tub} - 2 W}{2 L} \quad (2.71)$$

Donde L y W son el largo y el ancho del invernadero multicapilla tipo DAM, tal como ya se determinó en la sección 2.7.

Tal como se puede ver en las ecuaciones (2.63), (2.68) y (2.69), el largo de la tubería ( $L_{tub}$ ) y el flujo volumétrico (FV), varían según la potencia de calefacción ( $Q_{cal}$ ) requerida por el invernadero. En este sentido, el ajuste del largo ( $L_{tub}$ ) se realiza mediante un PLC que controla las electroválvulas que activan los bypass en el el zigzag que recorre las plantas en el invernadero tal como se explicó en el párrafo posterior a la Figura 2.15.

#### 2.24.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS BOMBAS Y DE LA CALDERA

El dimensionamiento de las bombas se puede obtener mediante las siguientes expresiones.

$$H_s = \frac{f L_{tub} 8 FV^2}{D^5 \pi^2 g} \quad (2.72)$$

$$f = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.73)$$

$$Re = \frac{\rho v_w D}{\mu} \quad (2.74)$$

$$FV_H = FV 3600 \quad (2.75)$$

Donde:

- $H_s$ : Pérdida de carga del sistema [m]

- $g$ : Aceleración de gravedad [ $\text{m s}^{-2}$ ]
- $f$ : Factor de fricción de Darcy.
- $Re$ : Número de Reynolds
- $\rho$ : Densidad del agua [ $\text{kg m}^3$ ]
- $\mu$ : Viscosidad dinámica del agua [ $\text{Pa s}$ ]
- $FV_H$ : Flujo volumétrico o caudal del sistema [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]

Entonces se selecciona una bomba con mayor altura y mayor caudal que la pérdida de carga ( $H_s$ ) y caudal ( $FV_H$ ) del sistema, para posteriormente con un variador de frecuencia ajustar la curva característica de la bomba de tal forma de llevarla al punto de operación del sistema.

Cuando la pérdida de carga del sistema sea muy superior a la altura de la bomba entonces éstas se pueden conectar en serie para aumentar la altura de presión de tal forma que sea mayor a la pérdida de carga del sistema. Todas las bombas conectadas en serie deben tener la misma altura nominal y un caudal nominal mayor que el caudal requerido por el sistema.

La potencia de la bomba o bombas en serie se ajusta mediante la ley de afinidad de bombas de acuerdo con la siguiente expresión.

$$P_B = P_N \frac{H_s}{H_N} \frac{FV_H}{FV_N} \quad (2.76)$$

La potencia eléctrica que alimenta a la bomba se puede obtener a partir de la siguiente expresión, asumiendo que la eficiencia eléctrica de la bomba es igual a 0,8.

$$P_E = 1,25 P_B \quad (2.77)$$

Donde:

- $P_B$ : Potencia real entregada por la bomba o bombas en serie [kW]
- $P_N$ : Potencia nominal del sistema de bombas [kW]

- $H_N$ : Altura nominal de la bomba [m]
- $FV_N$ : Flujo volumétrico nominal de la bomba [ $m^3 h^{-1}$ ]
- $P_E$ : Potencia eléctrica recibida por la bomba [kW]

El accionamiento de la cantidad de bombas en serie que se requieran en un momento dado será realizado a través de un PLC.

El dimensionamiento de la caldera se realiza considerando la potencia de calefacción requerida por el invernadero y el rendimiento de ésta, tal como se puede ver en la siguiente expresión.

$$P_{cal} = \frac{Q_{cal}}{\eta_{cal}} \quad (2.78)$$

Donde:

- $P_{cal}$ : Potencia de la caldera [kW]
- $\eta_{cal}$ : Rendimiento de la caldera, estimado en 0,9

## 2.25. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EN INVERNADEROS

El intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero incide de una manera clara en el clima de cultivo. No solamente cambia el balance de energía, por lo tanto, la temperatura del aire, sino que también afecta al contenido de vapor de agua y de anhídrido carbónico.

### 2.25.1. VENTILACIÓN NATURAL

La ventilación natural se basa en el principio de que aire caliente interior del invernadero asciende y sale por las ventanas cenitales, mientras que el aire exterior ingresa por las ventanas laterales. Este proceso establece corrientes de aire que ventilan el ambiente interior ayudando a controlar la temperatura y humedad. La ventilación lograda por este sistema depende del gradiente de temperatura entre el interior y el exterior, de la intensidad

y dirección del viento y de la construcción del invernadero.

La ventilación natural requiere que el área total de las ventanas esté dentro del 15% a 25% de la superficie cubierta. Para obtener una buena distribución del aire, las ventanas deben abarcar toda la longitud de la nave y en épocas frías o bien para poder regular la humedad, es necesario poder cerrarlas de forma progresiva, parcial o total. Esta maniobra puede ser manual o automática pero siempre será conveniente que esté mecanizada, centralizando su mando, para que de este modo en cambios bruscos del clima se pueda reaccionar con rapidez, por lo que si el sistema es automático se tendrá que equipar con sensores de lluvia, viento y térmicos para actuar (Plant Production and Protection Division, 2002).

### **2.25.2. VENTILACIÓN FORZADA**

La ventilación forzada se utiliza cuando la ventilación natural no es suficiente, especialmente en climas extremos o invernaderos grandes. La función de la ventilación forzada a parte de renovar el aire interior con el aire del exterior es bajar la temperatura y controlar la humedad del invernadero (Soler & Palau, s.f.).

Este tipo de ventilación consiste en un sistema de ventiladores helicoidales instalados sobre soportes en la superficie anterior o posterior del invernadero, distanciados hasta 7,5 metros uno de otro. Como requisito de seguridad los ventiladores deben contar con persianas de gravedad para evitar corrientes contrarias cuando los aparatos estén detenidos y una rejilla de protección para evitar el ingreso de pájaros o roedores, las aspas deben estar protegidas con tela metálica de alambre de 1,5 mm de grosor mínimo y aperturas de 13 mm. Esta especie de pantalla debe estar al menos a 100 mm de distancia de cualquier parte móvil para prevenir accidentes (Plant Production and Protection Division, 2002)

La conexión eléctrica de los ventiladores se debe hacer a través de un variador de frecuencia para así obtener regímenes de ventilación distintos de acuerdo con los requerimientos climáticos del cultivo (Soler & Palau, s.f.). Esto significa que de acuerdo con los requerimientos de enfriamiento del invernadero se va a regular el caudal total de ventilación, para lo cual se van a activar automáticamente mediante un PLC, una cantidad determinada de ventiladores a una determinada potencia, la cual se va a regir por las leyes de

afinidad.

A continuación, se muestra una ilustración esquemática de la disposición en planta de los ventiladores dentro del invernadero multicapilla.

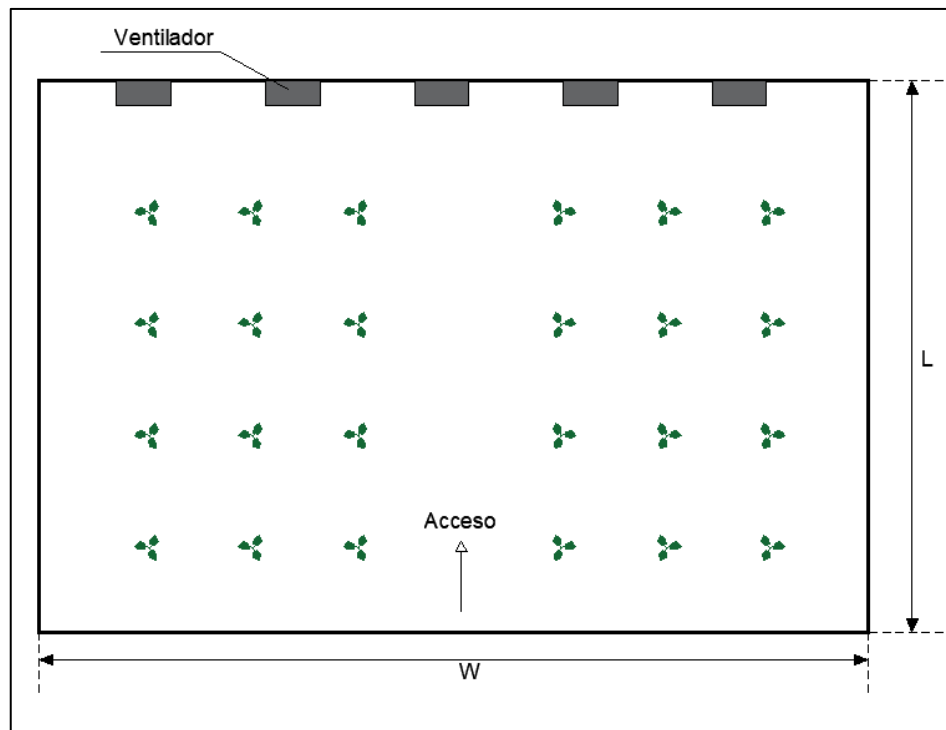


Figura 2.17 Vista esquemática de la distribución en planta de los ventiladores en el invernadero

### 2.25.3. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO POR NEBULIZACIÓN.

Este sistema consiste en distribuir por todo el invernadero pulverizadores de agua que esparcen pequeñas gotas por todo el ambiente que forman niebla, las cuales se evaporan, absorbiendo gran parte de la energía solar recibida enfriando el ambiente (Soler & Palau, s.f.).

Durante el tiempo de uso de los nebulizadores, el invernadero debe estar ventilado, para lo cual es importante abrir las ventanas ya que la ventilación aumenta la eficacia de este sistema (Valera, et al., 2008).

Un inconveniente a señalar es que los equipos pulverizadores son muy delicados por

la facilidad de obstruirse los pequeños orificios de las boquillas con las sales del agua, lo cual incrementa los costos de mantención (Soler & Palau, s.f.).

## 2.26. RIEGO

La demanda de agua para riego se explica por la evapotranspiración del cultivo, la cual se va a reponer diariamente. El sistema de riego a considerar en el presente estudio tiene un pozo y un estanque de almacenamiento con el agua bombeada desde el pozo, el cual va a estar en altura, de tal forma que el riego se realiza por gravedad. En el invernadero va a existir una tubería principal con derivaciones a lo largo de cada camellón para realizar el riego por goteo (Schmidt, 2012).

El valor de la demanda de agua para riego se puede obtener mediante la siguiente expresión (Uribe Cifuentes & Ruiz Muñoz, 2019).

$$D_w = \frac{ETc_d \ Sc \ Nc}{\eta_r} \quad (2.79)$$

Donde:

- $D_w$ : Demanda de agua para riego [ $l \text{ día}^{-1}$ ]
- $ETc_d$ : Evapotranspiración de cultivo diaria [ $l \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ].
- $\eta_r$ : Rendimiento de riego por goteo, el cual se estima en 0,9
- $Sc$ : Superficie de cada camellón del invernadero
- $Nc$ : Número de camellones del invernadero

La explicación del significado de la  $ETc$  y las expresiones para obtener su valor en [ $mm \text{ h}^{-1}$ ] o [ $l \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ] se pueden ver en las secciones 2.22.1 y 2.22.2. Y la  $ETc_d$  se obtiene mediante la sumatoria de la  $ETc$  obtenida para cada hora del día.

Por otro lado, el parámetro  $Nc$  se obtiene a partir de la ecuación (2.1) y el parámetro  $Sc$  se obtiene de la multiplicación del largo y ancho de cada camellón definidos en la sección 2.4.1.

El riego por gravedad se realizará al atardecer, en tanto que el llenado del estanque se realizará en horas donde la irradiancia del sol sea alta, de tal forma que se pueda evaluar la factibilidad de realizar el bombeo del agua con energía solar fotovoltaica.

Para calcular la potencia de la bomba sumergible solar se deben obtener el caudal o flujo volumétrico requerido y las pérdidas de carga del sistema.

El caudal para la reposición diaria del agua del estanque queda definido por la siguiente expresión:

$$FV_r = D_w \frac{1}{n_{hd} 1000} \quad (2.80)$$

Donde:

- $FV_r$ : Caudal o flujo volumétrico diario de llenado del estanque [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]
- $n_{hd}$ : Número de horas definidas para llenar el estanque al día [h]

El cálculo de las pérdidas de carga en la tubería de bombeo que parte desde la bomba hasta el espejo de agua del estanque, se obtiene a partir del procedimiento señalado desde la ecuación (2.72) hasta la ecuación (2.76) de la sección 2.24.2. Además de esa pérdida de carga hay que sumar la altura dinámica del pozo, la altura del espejo de agua del estanque respecto a la base de la estructura que lo soporta y las pérdidas generadas por los instrumentos como el filtro y el manómetro. Generalmente la altura dinámica tiene un valor de 30 m (Schmidt, 2012).

## 2.27. ERNC UTILIZADAS EN INVERNADEROS

Una forma de mejorar la eficiencia energética de los sistemas de climatización del invernadero es mediante la sustitución de fuentes de energía no renovables por ERNC.

Teniendo en cuenta las necesidades energéticas del invernadero se pueden plantear dos posibilidades de introducción de la energía solar:

- Instalación solar térmica como apoyo a la calefacción.
- Instalación solar fotovoltaica para alimentar equipos de refrigeración.
- Utilización de biomasa para calderas.

### 2.27.1. COLECTOR SOLAR TÉRMICO

Los sistemas de calefacción mixtos por suelo radiante aprovechan el calor del sol en época estival con un campo de colectores solares pequeño que acumula la energía a través de un fluido en grandes tanques en superficie o enterrados bajo el suelo del invernadero. De esta forma, durante la época de mayor demanda calorífica, permiten tener un reservorio de energía en perfectas condiciones para circularlo por el suelo radiante del invernadero produciendo un gran ahorro en el combustible fósil.

Cuando el sistema solar no sea capaz de proporcionar la energía necesaria para mantener la temperatura óptima del invernadero entrará en funcionamiento el sistema convencional; de esta forma se tiene garantizado el suministro y el ahorro energético con la diversificación a través de la energía solar térmica.

La inversión con las configuraciones previamente descritas es más alta en el sistema de acumulación que en el sistema de captación por colectores solares, el cual al ser relativamente pequeño no debiese sombrear en ninguna época del año la superficie del invernadero (Valera, et al., 2008).

La cantidad de colectores solares a instalar para poder cubrir los requerimientos de energía del invernadero están dados por las siguientes expresiones.

$$\eta = \eta_0 - kp_{lin} \frac{(T_{fl} - T_e)}{I_{prom}} - kp_{cuad} \frac{(T_{fl} - T_e)^2}{I_{prom}} \quad (2.81)$$

$$N_{cs} = \frac{Q_{cal} * 1000}{A_{cs} \eta I_{prom}} \quad (2.82)$$

Donde:

- $\eta$ : Rendimiento térmico del colector solar
- $\eta_0$ : Rendimiento óptico del colector solar
- $kp_{lin}$ : Factor de pérdidas lineal [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
- $T_{fl}$ : Temperatura del agua de entrada al colector [K]
- $T_e$ : Temperatura exterior al invernadero [K]
- $kp_{cuad}$ : Factor de pérdidas cuadráticas [ $W m^{-2} K^{-2}$ ]
- $I_{prom}$ : Irradiancia promedio durante las horas de sol [ $W m^{-2}$ ]
- $N_{cs}$ : Número de colectores solares a instalar
- $Q_{cal}$ : Potencia de calefacción requerida por el invernadero [kW]
- $A_{cs}$ : Superficie de cada colector solar [ $m^2$ ]

### 2.27.2. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

La energía solar fotovoltaica se puede utilizar para abastecer elementos aislados de bajo consumo como por ejemplo las bombas de riego o ventiladores.

Para introducir la energía solar fotovoltaica en los invernaderos es recomendable comenzar por pequeñas instalaciones que permitan abastecer elementos de bajo consumo y que requieran un uso continuo, como el sistema de control de la climatización y la fertirrigación (Valera, et al., 2008).

Los paneles fotovoltaicos se deben ubicar con un ángulo equivalente a la latitud del lugar de emplazamiento con respecto a una superficie horizontal, mirando hacia el norte para optimizar la irradiancia solar incidente.

La variación de la irradiancia en cada estación genera en cada uno de dichos periodos que los paneles fotovoltaicos cubran distintos porcentajes de la energía requerida por los equipos del invernadero alimentados con energía solar. La proporción de energía

cubierta por los paneles fotovoltaicos en un determinado periodo se va a denominar fracción solar (FS). Por lo tanto, la fracción solar dependerá de la cantidad de paneles solares que se instalen.

Para realizar el cálculo de la potencia entregada por un panel fotovoltaico, es necesario considerar que éstos tienen un valor nominal característico denominado potencia peak, la cual es igual a la potencia eléctrica generada por el panel al recibir una irradiancia solar de 1000 [W m<sup>-2</sup>] a una temperatura de las celdas de 25°C. Al respecto, el panel fotovoltaico va perdiendo su eficiencia a medida que las celdas se van calentando, razón por la cual existe un factor de corrección que está entre 0,8 y 0,9 para ajustar la potencia en el cálculo. Por último, la electricidad generada por el panel debe pasar por un inversor que transforma la corriente directa en corriente alterna para ser utilizada. En general se puede estimar que el inversor, tiene una eficiencia eléctrica de aproximadamente 0,9 (Schmidt, 2012).

Frente a lo anteriormente expuesto, la potencia que los paneles solares van a entregar se puede obtener mediante la siguiente expresión (Schmidt, 2012).

$$P_{pf} = P_p FC \eta_{inv} \frac{IG_{\varphi}}{1000} \quad (2.83)$$

Donde:

- $P_{pf}$ : Potencia entregada por el panel fotovoltaico considerando el inversor [kW]
- $P_p$ : Potencia peak del panel fotovoltaico [kW]
- FC: Factor de corrección del panel fotovoltaico
- $\eta_{inv}$ : Eficiencia eléctrica del inversor
- $IG_{\varphi}$ : Irradiancia solar global recibida por el panel inclinado [W m<sup>-2</sup>], la cual se puede calcular utilizando las ecuaciones (2.9), (2.10), (2.11) de la sección 2.13, evaluando la latitud del lugar ( $\varphi$ ) en el ángulo de inclinación del panel ( $\beta$ ).

La cantidad de paneles fotovoltaicos a utilizar se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$N_{pf} = \frac{P_{req}}{P_{pf}} \quad (2.84)$$

Donde:

- $N_{pf}$ : Cantidad de paneles fotovoltaicos requeridos
- $P_{req}$ : Potencia requerida por una determinada cantidad de equipos del invernadero, por ejemplo, las bombas y ventiladores [kW]

### 2.27.3. BIOMASA

La combustión de biomasa libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sin embargo, este mismo  $\text{CO}_2$  fue previamente absorbido de la atmósfera por las plantas a través de la fotosíntesis durante su crecimiento. Este proceso de absorción y liberación crea un ciclo de carbono cerrado, de corto plazo, lo que en teoría significa que la combustión de biomasa no incrementa las emisiones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Su uso contribuye a reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera siempre y cuando sustituya a un combustible fósil (Comisión Nacional de Energía, 2007)

La biomasa se puede utilizar en múltiples aplicaciones de generación de calor, incluidos los invernaderos. Las limitaciones técnicas son menores y la mayor parte de las veces salvables, por lo que en la mayor parte de los casos la viabilidad de la aplicación de biomasa viene determinada por los parámetros que determinan los costos de cada caso. Los sistemas de calefacción con biomasa tienen en muchos casos considerables ventajas económicas y son, generalmente, fáciles de realizar.

Los factores clave que determinan la viabilidad económica son dos, el número de horas de demanda de calor anuales y el tamaño de la caldera necesaria. El primero de ellos depende fundamentalmente de la localización del invernadero y del tipo de cultivo. El segundo factor depende fundamentalmente de la superficie de cultivo y del clima (Valera, et al., 2008).

La cantidad de biomasa a utilizar en un año se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$C_{BM} = \frac{E_R FBM}{PCI_{BM}} \quad (2.85)$$

Donde:

- $C_{BM}$ : Cantidad de biomasa utilizada [kg]
- $E_R$ : Energía anual requerida por el invernadero [kWh]
- $FBM$ : Fracción de biomasa. (Es la proporción de energía requerida que va a ser cubierta por la combustión de biomasa)
- $PCI_{BM}$ : Poder calorífico inferior de la biomasa en forma de pellets es igual a 4,582 [kWh kg<sup>-1</sup>]

La fracción de la energía requerida que no cubra la biomasa la va a proveer una caldera a diésel. En este caso la cantidad de este combustible fósil se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$C_D = \frac{E_R (1 - FBM)}{PCI_D \rho_d} \quad (2.86)$$

Donde:

- $C_D$ : Cantidad de diésel utilizado por la combustión de diésel [l]
- $PCI_D$ : Poder calorífico inferior del diésel es igual a 11,944 [kWh kg<sup>-1</sup>]
- $\rho_d$ : Densidad del combustible diésel es igual a 0,830 [kg l<sup>-1</sup>]

Si la caldera es a biomasa la potencia de calefacción se calcula de la siguiente forma:

$$P_{cal_B} = \frac{Q_{cal} FBM}{\eta_{cal}} \quad (2.87)$$

Si la caldera es a diésel la potencia de calefacción se calcula de la siguiente forma:

$$P_{cal_D} = \frac{Q_{cal} (1 - FBM)}{\eta_{cal}} \quad (2.88)$$

# METODOLOGÍA

## 3.1. LOCALIZACIÓN DEL INVERNADERO

Criterios de selección de la localización del estudio en base a los principales puntos de la sección 2.2.2:

- El emplazamiento del invernadero tecnificado debe estar en el Valle Central debido a que esta zona concentra la mayor superficie hortícola del país
- La hortaliza seleccionada para el estudio es el tomate debido a que es la principal hortaliza bajo invernadero
- La región seleccionada para el presente estudio es Valparaíso debido a que es la región que tiene la mayor superficie agrícola de tomates, la cual además tiene una tendencia lineal creciente.

En virtud de los puntos previamente expuestos se seleccionó la comuna de San Felipe para realizar el presente estudio debido a que es una comuna de gran actividad agrícola de la región de Valparaíso que está dentro del Valle Central.

## 3.2. PARÁMETROS CLIMÁTICOS DE SAN FELIPE

Se utilizó como emplazamiento de referencia para el invernadero la estación San Felipe Escuela Agrícola, la cual es propiedad de la Dirección meteorológica de Chile, debido a que con ello se puede tener acceso a los datos climáticos del lugar.

Específicamente la estación se encuentra ubicada en la comuna de San Felipe, Latitud  $-32.75^\circ$ , Longitud  $-70.70^\circ$ , Altitud 662 [m].

Los parámetros climáticos a considerar en el estudio son los siguientes:

- IDN: Irradiancia normal directa [ $W m^2$ ]
- DIFH: Irradiancia difusa horizontal [ $W m^2$ ]
- $T_e$ : Temperatura exterior [ $^\circ C$ ]

- $u$ : Velocidad del viento registrada por la estación [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $u$ : Velocidad del viento a 2 metros de altura [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $u_{2p}$ : Velocidad del viento perpendicular a las ventanas laterales [ $\text{m s}^{-1}$ ]
- $f_n$ : Factor de nubosidad ( $f_n=1$  nublado;  $f_n=0$  despejado)
- $HRe$ : Humedad relativa externa [%]

Todos estos parámetros están dados para una hora determinada en un mes determinado.

Los parámetros “IDN” (ver anexo M), “DIFH” (ver anexo N), “ $f_n$ ” (ver anexo Q) y “ $u$ ” se obtuvieron del Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile. En tanto que, la  $HRe$  (ver anexo R) se obtuvo del sitio web Tiempo3.com, el cual dispone de parámetros climáticos por hora, para cada día, de cada mes, de años anteriores, por lo que se consideraron varios días de un mes determinado y se estableció un promedio mensual de la  $HRe$  para cada una de las 24 horas del día. De esa forma  $HRe$  quedó determinada en función de la hora y el mes. Y la temperatura “ $T_e$ ” se obtuvo del Explorador Solar y la Dirección meteorológica de Chile.

El parámetro “ $u_2$ ” (ver anexo P) se calcula según la ecuación (G.5) del Anexo G y para obtener el parámetro “ $u_{2p}$ ” primero se obtienen los datos de la cantidad de observaciones que se tienen de las direcciones del viento, con lo cual, se puede calcular una probabilidad de ocurrencia para una determinada dirección del viento en cada mes. En segundo lugar, se establece la dirección Noreste – Suroeste de la ventana lateral de la superficie S7 del invernadero multicapilla (ver sección 2.8) como eje de referencia para calcular la componente del viento alineada con dicha dirección, mediante el coseno del ángulo ( $\alpha$ ) formado por la dirección del viento con respecto a la dirección de referencia. Entonces el parámetro “ $u_{2p}$ ” se obtiene del promedio ponderado de la multiplicación de “ $u_2$ ” con la probabilidad de ocurrencia de cada dirección del viento por el coseno del ángulo ( $\alpha$ ). Este cálculo se realiza para cada hora de un mes determinado.

### 3.3. DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL INVERNADERO

La forma del invernadero y sus parámetros y variables dimensionales están especificadas en la sección 2.7. Al respecto, los parámetros necesarios para calcular las variables dimensionales del invernadero son los siguientes.

Tabla 3.1 Parámetros de diseño del invernadero multicapilla DAM.

Parámetros	Valor	Unidad
Lm	50	m
Wm	8	m
Tg( $\alpha$ )	0,3	-
Ss	2000	m <sup>2</sup>

Los resultados obtenidos después de evaluar los parámetros de la Tabla 3.1 en las ecuaciones del Anexo A, son los siguientes.

Tabla 3.2 Cantidad de módulos y dimensiones del invernadero multicapilla DAM

Variables	Valor	Unidad
N	5	-
hp	2,6	m
h1	3	m
h2	3,8	m
Hvc	0,8	m
Lvc	40	m
Hvl	1,9	m
Lvl	40	m
V	6000	m <sup>3</sup>

La dimensión de las áreas del invernadero se obtuvo al aplicar el procedimiento descrito en la sección 2.8, en donde se utilizaron las dimensiones de las tablas 3.1 y 3.2. Al respecto, los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 3.3 Superficies del invernadero multicapilla tipo DAM

$S_1$	120	m <sup>2</sup>
$S_2$	120	m <sup>2</sup>
$S_3$	200	m <sup>2</sup>
$S_4$	1005	m <sup>2</sup>
$S_5$	1044	m <sup>2</sup>
$S_6$	130	m <sup>2</sup>
$S_7$	130	m <sup>2</sup>
$S_d$	2749	m <sup>2</sup>

Para obtener los resultados de las Tablas 3.2 y 3.3 todas las ecuaciones se resolvieron utilizando Excel.

### 3.4. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

El cultivo en invernadero del tomate puede tener hasta 2 ciclos de cultivo de 5 meses cada uno, tal como se especifica en la sección 2.3. En el presente estudio se estableció una temporada de otoño – invierno, desde mayo hasta septiembre y la temporada de primavera – verano, desde noviembre hasta marzo del año siguiente.

Para determinar la producción se consideraron los parámetros y las ecuaciones de la sección 2.3 y 2.4, los cuales se ingresaron a Excel en donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.4 Variables productivas de invernadero y producción anual de tomates

Superficie del invernadero [m <sup>2</sup> ]	2.000
N° de Camellones	38
Total de Hileras	76
Total de Plantas	7.524
Superficie Cultivada [m <sup>2</sup> ]	1.042,72
Superficie Cultivada [%]	52%
Producción [kg/ciclo]	90.288
<b>Total anual [kg]</b>	<b>180.576</b>

### 3.5. DETERMINACIÓN DE LA TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA

Como la transmisividad y la absorptividad a la radiación directa varía con respecto al ángulo de incidencia en el tiempo, en primer lugar, se realizó un código iterativo en Python utilizando la ecuación (2.13) de la sección 2.14 y las ecuaciones del Anexo C y el Anexo D, de tal forma que se obtuvo el ángulo de incidencia sobre cada superficie del invernadero para cada hora de cada día de los meses pertenecientes a los ciclos de cultivo. Se debe consignar que las horas señaladas corresponden a las horas de sol durante cada día del mes, las cuales se obtuvieron de los datos de las horas de radiación directa disponibles en el Explorador Solar del Ministerio de Energía de Chile y los días se contabilizaron como fechas julianas, es decir, de forma continua.

Posteriormente dentro del mismo código se calculó el promedio diario mensual del ángulo de incidencia sobre cada superficie del invernadero.

$$\theta_{j,h,m} = \sum_{\frac{df_m}{dt_m}}^{\frac{df_m}{dt_m}} \frac{\theta_{j,h,d,m}}{df_m - di_m} ; \forall j = \{1,2, \dots, 7\}; \forall m = \{1, 2, \dots, 9, 10\};$$

$$\forall h = [hi_m, hf_m] \quad (3.1)$$

Donde:

- $\theta_{j,h,m}$ : Ángulo de incidencia promedio para una superficie “j”, en una hora “h” en un mes “m” [rad]

- $m$ : Subíndice de cada mes perteneciente a los ciclos de cultivo
- $j$ : Subíndice de cada superficie del invernadero
- $h$ : Subíndice de cada hora de sol de los días de un mes.
- $hi_m$ : Primera hora de sol en el día para un mes “m”
- $hf_m$ : Última hora de sol en el día para un mes “m”
- $di_m$ : Día ordinal del año correspondiente al primer día de un mes “m”.
- $df_m$ : Día ordinal del año, correspondiente al último día de un mes “m”.

Los meses del primer ciclo de cultivo van desde noviembre a marzo y corresponden a los siguientes valores del subíndice  $m$ : {1, 2, 3, 4, 5}, en tanto que los meses del segundo ciclo de cultivo van desde mayo a septiembre y corresponden a los siguientes valores del subíndice  $m$ : {6, 7, 8, 9, 10}.

Esto significa que, para una superficie dada, el ángulo de incidencia promedio quedó en función sólo de la hora y del mes, al igual que los datos climáticos obtenidos del Explorador Solar.

Entonces se siguió desarrollando el código iterativo para evaluar el ángulo de incidencia promedio en las ecuaciones que permiten obtener la transmisividad y absortividad a la radiación directa, las cuales se encuentran en el Anexo E. Con esto también se logró dejar la transmisividad y absortividad a la radiación directa en función de la hora y el mes.

La transmisividad y absortividad a la radiación difusa y térmica de la cubierta y la malla son parámetros fijos determinados en la sección 2.15.2 y 2.15.3.

### **3.6. DETERMINACIÓN DE LA ABSORTIVIDAD Y EMISIVIDAD DEL SUELO**

La absortividad y emisividad del suelo del invernadero dependen del índice de área foliar (IAF), tal como se describe en la sección 2.15.4. y a su vez el IAF depende del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), el cual varía según la etapa de crecimiento de la planta (ver Tabla 2.3), de tal forma que cada mes tiene asignado un  $K_c$ , lo que implica que las ecuaciones del

Anexo F, que determinan la absorptividad y emisividad del suelo, van a quedar en función de un mes determinado.

La resolución de las ecuaciones anteriormente señaladas se realizó mediante la utilización de Python.

### 3.7. DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA

Las ecuaciones para la determinación de la radiación neta absorbida por el suelo y la cubierta del invernadero se establecieron en la sección 2.18. Dichas ecuaciones se resolvieron en Excel, para las 24 horas del día de cada uno de los meses de los ciclos de cultivo, de tal forma que, la radiación neta del invernadero se calculó de acuerdo con la siguiente expresión.

$$Rn_{h,m} = RT_{h,m} + \sum_{j=1}^{j=7} (B_{j,h,m} + D_{j,h,m}); \quad \forall h = \{0, 1, \dots, 22, 23\}; \quad \forall m = \{1, 2, \dots, 9, 10\} \quad (3.2)$$

Donde:

- $Rn_{h,m}$ : Radiación neta sobre el invernadero en una hora “h” de un mes “m”.
- $B_{j,h,m}$ : Potencia solar directa absorbida por una superficie “j” de la cubierta, en una hora “h” de un mes “m”
- $D_{j,h,m}$ : Radiación difusa absorbida por una superficie “j” de la cubierta, en una hora “h” de un mes “m”
- $RTn_{h,m}$ : Radiación térmica neta en una hora “h” de un mes “m”

Para resolver las ecuaciones (2.46), (2.47), (2.48) que determinan la radiación térmica neta sobre la cubierta se debe ejecutar algún método iterativo para su solución, entonces se resolvió el problema activando en Excel la casilla “Habilitar cálculo iterativo”. La ruta para llegar a dicha casilla es la siguiente: Archivo → Opciones → Fórmulas → Opciones de cálculo. Si no se activa dicha casilla no se puede resolver el sistema de

ecuaciones por referencias circulares.

### **3.8. DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DE CLIMATIZACIÓN**

Todas las variables del balance de energía (ver sección 2.16), se determinaron para cada hora de un mes determinado, por lo tanto, la potencia de climatización ( $Q_{cli}$ ), las pérdidas de calor y la radiación neta van a estar en función de la hora y del mes.

El procedimiento para determinar la potencia de climatización se logra mediante la regulación de los porcentajes de apertura de las ventanas (ver sección 2.9). En este sentido primero se define por diseño que las ventanas laterales y cenitales del invernadero son enrollables y funcionan de forma automatizada, de tal forma que modifican su porcentaje de apertura en cada hora, a medida que cambian los parámetros climáticos externos, con el propósito de mantener la temperatura interior en el valor requerido por el cultivo.

Los porcentajes de apertura de las ventanas laterales y cenitales determinan directamente la radiación neta ( $R_n$ ) en el invernadero (ver sección 2.18), la cual afecta directamente a las pérdidas por evapotranspiración ( $Q_{et}$ ) y a las pérdidas a través del suelo ( $Q_s$ ). Por otro lado, las pérdidas por ventilación ( $Q_v$ ) también dependen directamente del porcentaje de apertura de las ventanas. Al respecto, las ecuaciones que determinan las pérdidas se pueden ver en las secciones 2.20, 2.21 y 2.22, en donde se hace referencia al Anexo H y al Anexo I.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se puede ver con claridad que la potencia de climatización depende de los porcentajes de apertura de las ventanas, los cuales en términos prácticos regulan la temperatura y humedad del ambiente interior. Entonces, como la radiación neta, las pérdidas y la potencia de climatización ( $Q_{cli}$ ) están calculadas en Excel, se utilizó la herramienta Solver para determinar los porcentajes de apertura que generaban que la potencia de climatización fuese cero, considerando como restricción que la temperatura y la humedad interior debían estar en el rango admisible para el cultivo del tomate, en tanto que los porcentajes de apertura debían variar de 0,001% a 100%. En la primera hora del amanecer, como la temperatura era baja y estaba más cercanas al rango de temperaturas admisibles nocturna se utilizó dicho rango como restricción.

Por defecto, cuando Solver no encontraba soluciones arrojaba porcentajes de

apertura que generaban valores mínimos positivos o negativos de  $Q_{cli}$ . Entonces de acuerdo con el balance energético del invernadero (ver sección 2.16), en los casos en los que  $Q_{cli}$  era menor que cero, significaba que se debía enfriar el invernadero, en el caso en que  $Q_{cli}$  era mayor que cero evidentemente se debía calefaccionar.

El procedimiento previamente descrito, se realizó para cada hora (h) de un mes (m) determinado, de tal forma que la ecuación (2.15) del balance de energía en el invernadero se escribe de la siguiente forma:

$$Q_{cli_{h,m}} = Q_{cc_{h,m}} + Q_{et_{h,m}} + Q_{v_{h,m}} + Q_{s_{h,m}} - Rn_{h,m} \quad (3.3)$$

La potencia de climatización  $Q_{cli_{h,m}}$  requerida en el invernadero se encuentra en el Anexo S.

### **3.9. MÉTODO DE ENFRIAMIENTO**

Cuando la ventilación natural no alcanza a enfriar el interior del invernadero, se activa la ventilación forzada (ver sección 2.25.2), para lo cual se deben cerrar las ventanas laterales y cenitales. Entonces para resolver esto en Excel, de acuerdo con la sección anterior, cuando Solver determinaba que la mínima potencia de climatización correspondía a una potencia de enfriamiento ( $Q_{cli} < 0$ ), lo que se hacía era cerrar las ventanas cenitales y laterales, estableciendo que el porcentaje de apertura de dichas ventanas fuese igual a 0,001%, lo cual generaba que el caudal de ventilación natural fuese igual a cero y a su vez, esto permitía activar la ventilación forzada. Entonces se aplicó Solver para encontrar el valor necesario del caudal de aire generado por los ventiladores (ver Anexo I), para lograr un aumento de las pérdidas de calor por ventilación, de tal forma que  $Q_{cli}$  fuese igual a cero. En la utilización de Solver se mantuvieron las restricciones de la temperatura y humedad interior señaladas en la sección anterior.

Posteriormente, se cotizó un ventilador axial de tal forma que la cantidad de ventiladores que deben estar funcionando en el interior del invernadero se obtuvo mediante la siguiente expresión.

$$Nv = \text{Redondear.mas} \left( \frac{G_{vf}}{FV_{nv}} \right) \quad (3.4)$$

Donde:

- La función “Redondear.mas” redondea el resultado al entero superior
- $Nv$ : Número de ventiladores operativos
- $G_{vf}$ : Caudal generado por la ventilación forzada [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]
- $FV_{nv}$ : Flujo volumétrico nominal generado por un ventilador [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]

La cantidad de ventiladores a instalar corresponde a la cantidad de ventiladores operativos máxima obtenida para una hora determinada en un mes determinado. En el caso del presente estudio el máximo número de ventiladores es igual a 5, por lo cual se va a instalar un ventilador por cada módulo (ver Figura 2.17).

Por otro lado, como el número de ventiladores está redondeado al número entero superior, se debe ajustar la potencia de ventilación forzada para el enfriamiento del invernadero mediante la ley de afinidad de bombas, tal como se puede ver en las siguientes expresiones.

$$FV_v = \frac{G_{vf}}{Nv} \quad (3.5)$$

$$P_v = P_{nv} \left( \frac{FV_v}{FV_{nv}} \right)^3 \quad (3.6)$$

Donde:

- $FV_v$ : Caudal de ventilación de cada ventilador operativo [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]
- $P_v$ : Potencia de cada ventilador [kW]
- $P_{nv}$ : Potencia nominal de cada ventilador [kW]

Entonces la potencia total entregada por los ventiladores operativos ( $P_{Tv}$ ) en cada

hora de un mes determinado está dada por la siguiente expresión.

$$P_{Tv} = Nv P_v \quad (3.7)$$

La potencia total entregada por utilizada en el invernadero para cada hora de cada mes se puede visualizar en el Anexo T.

### 3.10. MÉTODO DE CALEFACCIÓN

El método de calefacción seleccionado consiste en un sistema compuesto por tuberías de polietileno, electroválvulas, bombas y caldera que transportan agua caliente (ver sección 2.24.).

Cuando al regular el porcentaje de las ventanas aplicando Solver, se obtenía que  $Qcli_{h,m} > 0$ , para una hora “h” y un mes “m”, entonces se procedía primero, a ingresar las ecuaciones de la sección 2.24.1, las cuales permiten determinar el largo de la tubería, además del caudal y la velocidad del agua a través de la tubería. Al respecto, se debe considerar que para resolver dichas ecuaciones es necesario ingresar como parámetros el diámetro de la tubería, la temperatura óptima interior del invernadero (ver Tabla 2.5) y la temperatura del agua de entrada y de salida a la tubería las cuales, según el estudio de Valera et al., 2008, son 70 [°C] y 40 [°C] respectivamente.

Una vez obtenidas las variables previamente señaladas, se procede a calcular las pérdidas de carga a través de las tuberías, ingresando a Excel las ecuaciones (2.72) y (2.73) denominadas ecuación de Darcy – Weisbach y ecuación de Colebrook – White respectivamente, en donde la ecuación de Colebrook – White requiere que esté activada la casilla “Cálculo iterativo de Excel”.

El criterio para escoger los valores nominales y la cantidad necesaria de bombas en serie se explica en la sección 2.24.2. Entonces una vez seleccionadas las bombas se incorpora en Excel la ecuación (2.76) relativa a las leyes de afinidad, para obtener la potencia entregada por la bomba en el punto de operación requerido.

Se seleccionaron dos tuberías con diferentes diámetros, las cuales conforman dos circuitos cerrados por separado dentro del sistema, siguiendo el mismo recorrido en zigzag

indicado en la figura 2.15. Dichos circuitos solamente están activos uno a la vez, dependiendo de que el diámetro al ser evaluado en la ecuación (2.70), genere valores de velocidad del agua admisibles. De esta forma los diámetros seleccionados fueron de 32 y 50 mm.

El número de vueltas del recorrido en zigzag de la tubería se obtiene mediante la ecuación (2.71), y depende del largo de la tubería obtenido para una hora de un mes determinado. En este sentido, el largo máximo de los dos circuitos se va ajustando mediante electroválvulas controladas por un PLC, cuyo objetivo es activar un bypass ubicado entre cada vuelta (ver Figura 2.15.) y así ajustar el número de vueltas de acuerdo con el largo obtenido en función de la potencia de calefacción.

La cantidad máxima de vueltas por camellón para la tubería de 50 mm es de 45, la cual se obtuvo para el mes de julio a las 6:00 horas. Entonces como el invernadero tiene 38 camellones, la tubería al completar dicha cantidad vueltas por camellón, se devuelve en zigzag completando 7 vueltas más, para posteriormente retornar a la caldera. En tanto que la cantidad máxima vueltas por camellón de la tubería de 32 mm es de 24 y se obtuvo en diciembre a las 23:00 horas.

El cambio de circuito, la activación de las electroválvulas y la conexión en serie de las bombas se realiza mediante un PLC.

La temperatura del agua de entrada al circuito de calefacción es 70 [°C] y la temperatura del agua de salida es 40 [°C].

### **3.11. MÉTODO DE RIEGO**

El sistema de riego utilizado se describe en la sección 2.26, el cual básicamente consiste en riego por goteo, en donde el agua que se va a utilizar para tales efectos estará almacenada en un estanque en altura de tal forma que sea impulsada por gravedad. Se estableció que el agua será transportada hasta el estanque mediante la acción de una bomba desde un pozo a través de una tubería. Para el presente análisis se estableció además que la bomba del pozo va a funcionar durante 3 horas para reponer la cantidad de agua utilizada para el riego diario. Al respecto, como se va a evaluar la instalación de una bomba sumergible solar, se seleccionaron las horas con mayor irradiancia, las cuales en general, están entre las 14:00 y las 16:00 horas. Por otro lado, se estableció que el riego se va a realizar en el

atardecer.

Teniendo la cantidad de horas de funcionamiento de la bomba del pozo, se puede obtener el caudal de reposición del agua del estanque aplicando las ecuaciones (2.79) y (2.80).

A continuación, se calcularon las pérdidas de carga del sistema de reposición del agua del estanque. En este sentido, se consideró que la tubería que transporta el agua desde la bomba hasta el estanque tiene un largo de 45 [m] y un diámetro de 25 [mm], entonces aplicando estos valores en las ecuaciones (2.72) y (2.73), se logra obtener una pérdida de carga para la tubería ( $H_{tub}$ ) de 0,71 [m]. La profundidad del espejo de agua del pozo respecto de la superficie exterior, denominada altura dinámica ( $H_{din}$ ), tiene un valor típico de 30 [m]. Por otro lado, se estableció que la altura del estanque respecto de la base de la estructura que lo sostiene ( $H_{est}$ ) en 5,3 [m]. A continuación, se señala la pérdida de carga de los siguientes instrumentos instalados en la tubería:

- Filtro: 2 [m]
- Caudalímetro: 0,2 [m]
- Dos manómetros: 0,4 [m]

Entonces la pérdida de carga total del sistema de transporte del agua de reposición del estanque se puede aproximar a 39 [m]

La bomba sumergible solar seleccionada es el modelo SQF 5A-7 de la marca Grundfos, la cual presenta los siguientes valores nominales.

- Potencia = 900 [W]
- Flujo Volumétrico = 2,75 [m<sup>3</sup> h]
- Altura de presión = 45 [m]

Entonces se debe utilizar un variador de frecuencia para llevar los valores nominales de la bomba a su punto de operación, en donde la potencia que entrega la bomba se calcula aplicando la ecuación (2.76).

### 3.12. DETERMINACIÓN DE ERNC A UTILIZAR

Para la calefacción del invernadero, se evaluó por separado la instalación de colectores solares y de una caldera de biomasa, como energía de reemplazo en un cierto porcentaje a la energía de una caldera de diésel.

En primer lugar, es necesario establecer que la calefacción del invernadero es requerida principalmente en la noche y en la primera hora del amanecer en donde la radiación solar es muy baja. Esto implica que la energía que los colectores solares vayan capturando durante el día se tendría que almacenar en un termotanque, el cual debe suministrar energía durante la noche como apoyo a la energía entregada por una caldera a diésel. Para obtener la cantidad de colectores solares necesarios para almacenar la energía requerida por el invernadero en la noche se utilizaron los parámetros característicos del colector solar modelo 7000 TF de la marca BOSCH, los cuales se señalan a continuación:

- Rendimiento óptico: de 0,8
- Pérdidas lineales:  $3,8 \text{ [W m}^{-2} \text{ k}^{-1}]$
- Pérdidas cuadráticas:  $0,014 \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$
- Superficie:  $2,43 \text{ [m}^2]$

Por otro lado, también se utilizó como parámetro la temperatura del agua a través del colector, la cual se considera igual al promedio entre la temperatura del agua de entrada y de salida de la tubería de calefacción, lo que equivale a  $55 \text{ [}^\circ\text{C]}$  y la irradiancia sobre el colector solar se considera como el promedio de la irradiancia incidente durante las horas de sol en cada mes. Entonces los parámetros previamente establecidos se evaluaron en las ecuaciones (2.81) y (2.82), donde como resultado se obtuvo que la cantidad de colectores solares para que el termotanque pueda suministrar energía por al menos 1 hora, en prácticamente todos los casos era superior a 100, lo cual implicaría la utilización de demasiado espacio para instalarlos. Por estos motivos, se descarta la opción de la instalación de colectores solares para el invernadero que se está analizando.

Debido a lo anterior, se optó sólo por invertir en una caldera que utilizara biomasa como ERNC, de tal forma que entregase un cierto porcentaje de la potencia de calefacción requerida por el invernadero, donde el otro porcentaje debe ser suministrado por la caldera

de diésel. La fracción de biomasa (FBM) a utilizar en el estudio es de 50%, 60%, 70% y 80%, lo cual determina la potencia de la caldera y con ello la inversión que se debe hacer en este equipo. No se seleccionaron el 90% y 100% de FBM debido a que la inversión en la caldera subía su valor prácticamente al doble.

La potencia de calefacción de la caldera a biomasa y a diésel se calculó utilizando las ecuaciones (2.87) y (2.88) respectivamente, en donde se utilizó un rendimiento de la caldera igual a 0,9.

Para obtener la cantidad de kilogramos de biomasa y la cantidad de litros de combustible diésel a utilizar en un año, se debe aplicar la ecuación (2.85) y (2.86), respectivamente. En ambas ecuaciones hay que evaluar la energía requerida ( $E_R$ ) para calefacción en el periodo de un año, lo que implica que la variable  $E_R$  se debe calcular de la siguiente forma.

$$E_R = \sum_{m=1}^{m=10} \sum_{h=0}^{h=23} 30 Q_{cal_{h,m}} \quad (3.8)$$

Donde:

- $Q_{cal_{h,m}}$ : Potencia de calefacción requerida en una hora “h”, dentro de las 24 horas del día, para un mes “m” determinado, dentro de los ciclos de cultivo [kW].
- El número 30 se refiere al número promedio de días por mes.

Por otro lado, se analizó la instalación de paneles solares fotovoltaicos para la alimentación eléctrica de los ventiladores axiales y para la bomba del pozo durante el periodo diurno de cada mes y se pudo constatar que la máxima demanda de potencia eléctrica es generada por el sistema de ventilación a las 18:00 horas del mes de enero. En este sentido, aplicando las ecuaciones de la sección 2.27.2, se determinó que la cantidad máxima de paneles a instalar para satisfacer dicha demanda puntual es de 26 unidades. Esto implica que esta va a ser la cantidad de paneles que se van a instalar para el suministro de ERNC al invernadero. Entonces en general las horas donde se requiera energía solar para ventilación

y riego, con excepción de las 18:00 horas del mes de enero, se van a requerir menos de los 26 paneles instalados, lo que implica que se va a producir un excedente de energía, el cual se va a inyectar a la red. El precio por kWh de energía solar inyectada a la red es de 60 CLP (Ministerio de Energía, s.f.).

El sistema de bombas para agua de calefacción que se utiliza en la primera hora del amanecer se conecta directamente a la red, debido a que como la irradiancia es muy baja a esa hora de la mañana se tendría que instalar un número excesivo de paneles para lograr cubrir la energía requerida. Entonces para la alimentación de las bombas de calefacción se aplica la tarifa del kWh de Chilquinta, la cual es de 166 CLP.

Entonces, una vez establecidos los requerimientos de potencia por parte de los equipos, se calculó el consumo diario de energía solar y desde la red en cada mes. Los resultados se pueden visualizar en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 3.5 Consumo diario de energía solar y desde la red por cada mes

	Consumo Solar [kWh/día]	Consumo Red [kWh/día]	Energía para vender [kWh/día]
Noviembre	13,59	0,23	23,03
Diciembre	15,01	1,31	23,36
Enero	19,02	3,87	17,61
Febrero	18,52	0,09	19,82
Marzo	17,94	2,35	17,81
Mayo	3,40	0,00	18,70
Junio	2,02	8,88	17,48
Julio	2,02	9,14	17,43
Agosto	1,27	0,74	0,63
Septiembre	1,16	2,60	26,01

A partir de la Tabla 3.5 se calculó el consumo diario anual de energía solar y desde la red asumiendo que cada mes tiene 30 días. Los resultados se pueden ver en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 3.6 Consumo diario anual de energía solar y desde la red

Consumo Solar [kWh/año]	2.818
Consumo red [kWh/año]	876
Consumo Total [kWh/año]	3.695
FS_anual	76%
Venta Total [kWh/año]	5.456

Tomando en consideración el precio de venta del kWh solar y el precio del kWh de la red anteriormente indicados, se calculó el ingreso anual por venta energía solar y el costo anual por el consumo de energía desde la red.

Tabla 3.7 Ingreso anual por venta de energía solar y costo anual por consumo de energía de la red.

Ingreso Venta [CLP/año]	327.380
Costo Consumo [CLP/año]	145.461
Ingreso neto [CLP/año]	181.919

Esto implica que el beneficio de instalar los 26 paneles fotovoltaicos es igual al ingreso neto anual de la Tabla 3.7 más el ahorro que se genera por consumir energía solar en vez de energía desde la red. Este ahorro se calcula multiplicando el consumo diario anual solar de la Tabla 3.6 por el precio de la tarifa del kWh de la red, de tal forma que el resultado es 467.869 [CLP]. Entonces el beneficio anual de instalar los 26 paneles es igual 649.788 [CLP]. Suponiendo que este beneficio se mantiene constante en los 10 años de evaluación del proyecto, su VAN a una tasa de descuento de 12% sería igual a 3.671.448 [CLP].

En la tabla que se presenta a continuación se puede ver la inversión que se debe realizar para instalar los 26 paneles de 200 [Wp].

Tabla 3.8 Inversión para la instalación de los 26 paneles

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor[CLP]	Total [CLP]
<b>Energía FV</b>				<b>7.750.000</b>
Paneles FV	un	26	80.000	2.080.000
Inversor	un	1	470.000	470.000
Instalación	Wp	5.200	1.000	5.200.000

Contrastando el beneficio de instalar los 26 paneles versus la inversión que hay que realizar para tales efectos, se puede concluir que no es viable económicamente realizar dicha inversión. Por lo tanto, el invernadero sólo utilizará biomasa como ERNC.

# EVALUACIÓN ECONÓMICA

## 4.1. INVERSIÓN

### 4.1.1. INVERSIÓN EN CAPITAL FIJO

Tal como se determinó en la sección anterior, la inversión en ERNC se va a focalizar sólo en la utilización de biomasa. Para obtener la potencia de calefacción que debe entregar la caldera a biomasa ( $Pcal_B$ ) y la caldera a diésel ( $Pcal_D$ ) se aplicaron las ecuaciones (2.87) y (2.88) respectivamente.

A continuación, se van a presentar los valores de la potencia de calefacción que debe entregar la caldera a biomasa ( $Pcal_B$ ) y la caldera a diésel ( $Pcal_D$ ), de acuerdo con la fracción de biomasa a utilizar (FBM).

Tabla 4.1 Potencia de calefacción para la caldera de biomasa y de diésel

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$Pcal_B$ [kW]	174	209	244	279	313	348
$Pcal_D$ [kW]	174	139	104	70	35	0

En base a las potencias ( $Pcal_B$ ) y ( $Pcal_D$ ) obtenidas para cada FBM se cotizaron los valores de la caldera a biomasa y a diésel y se estimó el costo de instalación en un 10% del costo de las calderas.

A continuación, se presentan los costos de las calderas y la instalación de éstas, según la FBM utilizada.

Tabla 4.2 Costos asociados a la caldera de biomasa y diésel según la FBM [CLP]

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Caldera BM	33.129.600	39.793.600	46.457.600	53.121.600	99.193.456	110.285.376
Caldera D	24.000.000	16.000.000	9.500.000	4.500.000	3.000.000	-
Instalación	5.712.960	5.579.360	5.595.760	5.762.160	10.219.346	11.028.538
Total	62.842.560	61.372.960	61.553.360	63.383.760	112.412.802	121.313.914

Observando la Tabla 4.2 se descarta la FBM igual a 0,9 y 1, puesto que el costo asociado a la caldera de biomasa se incrementa prácticamente al doble del costo asociado a la FBM igual a 0,8.

A continuación, se presentan los costos asociados al capital fijo sin considerar las calderas.

Tabla 4.3 Tabla resumen del costo de capital fijo sin considerar el costo asociado a las calderas

ítem	Capital Fijo (CLP)	Capital Fijo (%)
Estructura	42.000.000	37%
Cubierta	4.991.250	4%
Ventilación	12.013.239	11%
Calefacción	41.655.760	37%
Riego	13.142.352	12%
<b>Total</b>	<b>113.802.600</b>	<b>100%</b>

El desglose de la Tabla 4.3 se encuentra en el Anexo J, donde se presenta la composición de cada uno de los ítems de dicha tabla.

Se puede observar en la Tabla 4.3 que los mayores costos se concentran en el ítem Estructura y Calefacción.

En promedio el costo del capital fijo asociado a la caldera para las FBM entre 0,5 y 0,8 son cercanos a CLP 60.000.000. Por lo tanto, se puede establecer que el costo total del capital fijo es aproximadamente igual a CLP 173.802.600. Si el valor promedio del costo de la caldera previamente señalado se incluye en el ítem Calefacción de la Tabla 4.3, el

porcentaje de este ítem subiría a 58% y el de Estructuras bajaría a 24%. Entonces se puede establecer con claridad que los costos asociados a calefacción son los más relevantes dentro del capital fijo.

Utilizando los costos asociados a la caldera, establecido en la tabla 4.2, se puede establecer el capital fijo total para cada FBM utilizada en el análisis del invernadero.

Tabla 4.4 Capital fijo total para cada FBM a utilizar en la evaluación [CLP]

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8
Capital Fijo Total	176.645.160	175.175.560	175.355.960	177.186.360

#### 4.1.2. INVERSIÓN EN CAPITAL DE TRABAJO

La inversión en capital de trabajo se estimó en base a los costos operacionales que se van a tener durante la primera temporada de noviembre a marzo, en donde no van a haber ingresos hasta la venta de la primera producción.

Dentro de los costos operacionales más importantes está la compra de biomasa y diésel para las calderas, dichos costos dependen de la FBM, por lo tanto, el capital de trabajo también depende de dicho factor. De esta forma, como parte del capital de trabajo se debe considerar el costo por la compra de combustible para las calderas durante el periodo de noviembre a marzo, correspondiente al primer ciclo de cultivo.

Por su parte, el costo operacional correspondiente a 2 ciclos de cultivo (1 año) por concepto de mano de obra, maquinaria, insumos, mantención, consumo eléctrico, administración e imprevistos es igual a CLP 44.780.693, por lo tanto, el costo operacional por los conceptos antes mencionados en un ciclo de cultivo es igual a CLP 22.390.346. Entonces el capital de trabajo total se obtiene de la suma del costo por la compra de combustible y por los otros costos operacionales previamente señalados.

Considerando lo anteriormente expuesto, a continuación, se presentan los costos operacionales por compra de combustible y el valor total del capital de trabajo en el primer ciclo de cultivo, para cada FBM utilizada.

Tabla 4.5 Capital de trabajo de la primera temporada noviembre – marzo [CLP].

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8
Costo por compra de combustibles	23.560.001	22.122.866	20.685.732	19.248.597
<b>Capital de trabajo</b>	<b>45.950.348</b>	<b>44.513.213</b>	<b>43.076.078</b>	<b>41.638.943</b>

#### 4.1.3. INVERSIÓN TOTAL

La inversión total para la implementación del invernadero es la suma del capital fijo más el capital de trabajo, los cuales dependen de la FBM a utilizar para la evaluación económica, tal como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.6 Inversión total en la implementación del invernadero [CLP]

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8
Cap. Fijo	176.645.160	175.175.560	175.355.960	177.186.360
Cap. Trabajo	45.950.348	44.513.213	43.076.078	41.638.943
<b>Inversión Total</b>	<b>222.595.508</b>	<b>219.688.773</b>	<b>218.432.038</b>	<b>218.825.303</b>

Observando la Tabla 4.6 se puede ver que la inversión en capital fijo y de capital de trabajo no presentan cambios significativos al variar la FBM, por lo tanto, se establece como inversión total el promedio de las inversiones obtenidas para cada FBM, lo cual dio el siguiente resultado:

Tabla 4.7 Inversión total promedio [CLP]

Cap. Fijo promedio	176.090.760
Cap. Trabajo promedio	43.876.918
<b>Inversión total promedio</b>	<b>219.967.678</b>

## 4.2. COSTOS OPERACIONALES

Se encontraron costos operacionales de referencia para una temporada del año 2014 de un invernadero de 1 hectárea, de tecnología media en la región de Valparaíso. Dicha estructura de costos fue diseñada por el INDAP (ver Anexo K).

Entonces en primer lugar se establecieron los costos operacionales del invernadero previamente descrito para 2 temporadas, tal como se puede ver a continuación.

Tabla 4.8 Costos operacionales anuales de referencia de un invernadero de 1 hectárea el año 2014

ítem	Costo [CLP]
Mano de Obra	18.528.000
Maquinaria	1.180.000
Insumos	27.896.914
<b>Total</b>	<b>47.604.914</b>

Para ajustar los costos de referencia al invernadero del presente estudio se utilizó la siguiente expresión:

$$C_{op} = 0,2 C_{ref} \frac{UF_{2024}}{UF_{2014}} 1,2 \quad (4.1)$$

Donde:

- $C_{op}$ : Costo operacional del invernadero [CLP]
- El número 0,2 es la proporción entre la superficie del invernadero del presente estudio con respecto al invernadero de referencia
- $C_{ref}$ : Costo operacional de referencia [CLP]
- $UF_{2024}$  y  $UF_{2014}$ : Promedio anual de la UF del año 2024 y 2014
- El número 1,2 representa un ajuste del 20% por sobre los ajustes proporcionales de la expresión, debido a que se puede considerar que el invernadero del presente estudio tiene una tecnología media – alta y el de referencia solo tiene tecnología

media.

Entonces los costos asociados al invernadero de referencia ajustados al invernadero del presente estudio se pueden ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.9 Costos operacionales anuales de referencia ajustados al invernadero en estudio

<b>Ítem</b>	<b>Costo [CLP]</b>
Mano de Obra	6.936.597
Maquinaria	1.840.724
Insumos	8.703.478
<b>Total</b>	<b>17.480.799</b>

La mantención anual de la cubierta y equipos del invernadero se realizará en abril y octubre, dicha mantención tiene asociada los siguientes costos operacionales.

Tabla 4.10 Costos operacionales de mantención de la cubierta y equipos del invernadero [CLP]

<b>Mantención Anual Invernadero</b>	<b>Abril</b>	<b>Octubre</b>
Polietileno y automatización		2.600.000
PLC y sensores		1.200.000
Ventiladores axiales		1.750.000
Caldera de Biomasa	3.200.000	
Caldera de Gasoil	2.300.000	
<b>Total</b>	<b>5.500.000</b>	<b>5.550.000</b>

En base a lo anteriormente expuesto, los costos operacionales anuales, sin considerar el costo por la compra de combustible, son los siguientes:

Tabla 4.11 Costos operacionales ajustados según la ecuación 4.1 y el costo total de mantención.

Ítem	Costo [CLP]
Mano de Obra	6.936.597
Maquinaria	1.840.724
Insumos	8.703.478
Mantención	11.050.000
Consumo red	609.904
Imprevistos	1.454.535
Administración	14.400.000
<b>Total</b>	<b>44.997.738</b>

Por otro lado, el precio de la biomasa y el diésel son los siguientes:

- Precio del kilogramo de pellet de biomasa: 320 CLP (Buena Caldera, s.f.)
- Precio del litro de diésel en la región de Valparaíso: 955 CLP (Lira, 2025)

La cantidad de kilogramos por cada hora de calefacción utilizando biomasa y diésel se obtuvo a partir de las ecuaciones (2.85), (2.86) y (3.8), posteriormente al sumar todas las horas diarias con calefacción se pueden establecer los costos operacionales mensuales y anuales por consumo de combustible.

Tabla 4.12 Costo anual de la biomasa y del diésel para el invernadero en función de la FBM

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8
Costo por compra de combustibles [CLP]	75.249.402	70.659.269	66.069.136	61.479.003

A continuación, se muestra el costo operacional total asociado a la FBM utilizada.

Tabla 4.13 Costo operacional total anual del invernadero en función de la FBM

FBM	0,5	0,6	0,7	0,8
Costo Operacional Total [CLP]	120.247.140	115.657.007	111.066.874	106.476.742

Observando la Tabla 4.12 y 4.13 se puede establecer que el costo operacional por compra de combustible es aproximadamente el 60% del costo operacional total.

### 4.3. DEPRECIACIÓN

La implementación del invernadero se va a evaluar en un horizonte de tiempo de 10 años y se va a utilizar depreciación lineal para el capital fijo.

Entonces, a continuación, a partir de la información disponible en el SII se presenta la vida útil correspondiente al capital fijo del invernadero en la siguiente tabla.

Tabla 4.14 Vida útil del capital fijo del invernadero

Ítem	Vida útil	Costo [CLP]
Estructura	20	51.982.500
Caldera gasoil	15	7.381.080
Caldera BM	15	56.002.680
Ventiladores	10	8.724.924
Bombas	10	3.409.536
Bomba elevadora	20	1.756.796
Tuberías	18	12.536.841
Válvula reguladora de presión	10	19.169.994
Sistema de automatización	10	9.500.000
Variador de frecuencia	10	576.630
Pozo	20	10.000.000
Estanque agua de riego	10	560.000
Cubierta	3	4.991.250

Observando la Tabla 4.14 se puede ver que sólo debe haber reinversión en la

cubierta cada 3 años, que es el periodo recomendado para cambiarla, por lo tanto, el valor libro para la cubierta al final del periodo de evaluación será igual a 2 veces su depreciación anual.

A continuación, se presentan los valores correspondientes a la depreciación lineal y al valor libro del capital fijo al final del periodo de evaluación.

Tabla 4.15 Depreciación lineal durante el periodo de evaluación y el valor libro

Periodo	Depreciación anual [CLP]	Valor Libro [CLP]
Estructura	2.599.125	25.991.250
Caldera diésel	492.072	2.460.360
Caldera biomasa	3.733.512	18.667.560
Ventiladores	872.492	-
Bombas	340.954	-
Bomba elevadora	87.840	878.398
Tuberías	696.491	5.571.929
Válvulas	1.916.999	-
Sistema de automatización	950.000	-
Variador de frecuencia	57.663	-
Pozo	500.000	5.000.000
Estanque agua de riego	56.000	-
Cubierta	1.663.750	3.327.500
<b>Total</b>	<b>13.966.898</b>	<b>61.716.597</b>

#### 4.4. FINANCIAMIENTO

La implementación del invernadero tecnificado se va a evaluar con un 50% y 75% de financiamiento. El préstamo será solicitado a Banco Estado, el cual tiene un servicio de financiamiento para la pequeña empresa agrícola con diferentes tasas de interés según los montos de crédito. En este sentido, la tasa de interés para la implementación del invernadero será de 6,10% y el plazo para pagar el crédito es de 4 años (ver Tabla 2.4).

A continuación, se presenta una tabla con el crédito de 50% y de 75% y con las respectivas cuotas constantes que se deben pagar anualmente obtenidas de tablas de amortización.

Tabla 4.16 Valor del crédito y de la cuota constante.

Crédito	50%	75%
Valor [CLP]	109.996.964	164.995.446
Cuota [CLP]	\$31.801.213	\$47.701.820

## 4.5. INGRESOS

Desde la página web denominada series históricas de frutas y verduras perteneciente al sitio web ODEPA, se descargaron los precios promedio mensuales mayoristas del tomate de primera calidad, procedentes de la región de Valparaíso desde el año 2010 hasta el 2024. Con ello se pudo calcular el precio promedio anual mayorista del tomate con las características ya descritas.

A continuación, se muestra una tabla con el precio promedio anual mayorista del tomate de primera desde 2010 hasta 2024.

Tabla 4.17 Precio mayorista del tomate de primera procedente de la región de Valparaíso

Escala de tiempo	Precio promedio [CLP/kg]
2010	932
2011	931
2012	873
2013	918
2014	965
2015	816
2016	947
2017	829
2018	889
2019	829
2020	963
2021	948
2022	1.019
2023	915
2024	883

Para visualizar el comportamiento del precio promedio del kilogramo de tomate en el tiempo, a continuación, se presenta el gráfico de los datos de la Tabla 4.17.

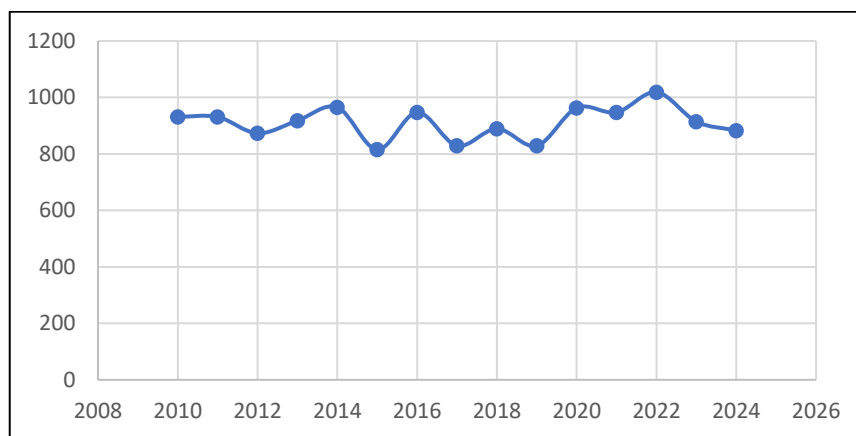


Gráfico 4.1 Precio mayorista de tomate de primera proveniente de la región de Valparaíso

El gráfico 4.1 muestra que el precio mayorista del kilogramo de tomate de primera calidad es bastante estable en torno a su promedio (CLP 911) y va oscilando entre valores cercanos a CLP 1.000 y CLP 800.

Entonces considerando la estabilidad en el comportamiento histórico del precio, se realiza un pronóstico a 10 años mediante la aplicación de la herramienta de Excel denominada “Previsión”, en donde el resultado se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 4.18 Precio mayorista pronosticado para el tomate de primera de la región de Valparaíso [CLP / kg]

Año	Precio promedio	Límite de confianza superior	Límite de confianza inferior
2025	925	807	1.043
2026	926	807	1.045
2027	927	807	1.047
2028	929	808	1.049
2029	930	808	1.051
2030	931	808	1.054
2031	932	808	1.056
2032	933	808	1.058
2033	934	808	1.060
2034	935	808	1.062

A continuación, se presenta el gráfico del pronóstico entregado por la herramienta Previsión de Excel.

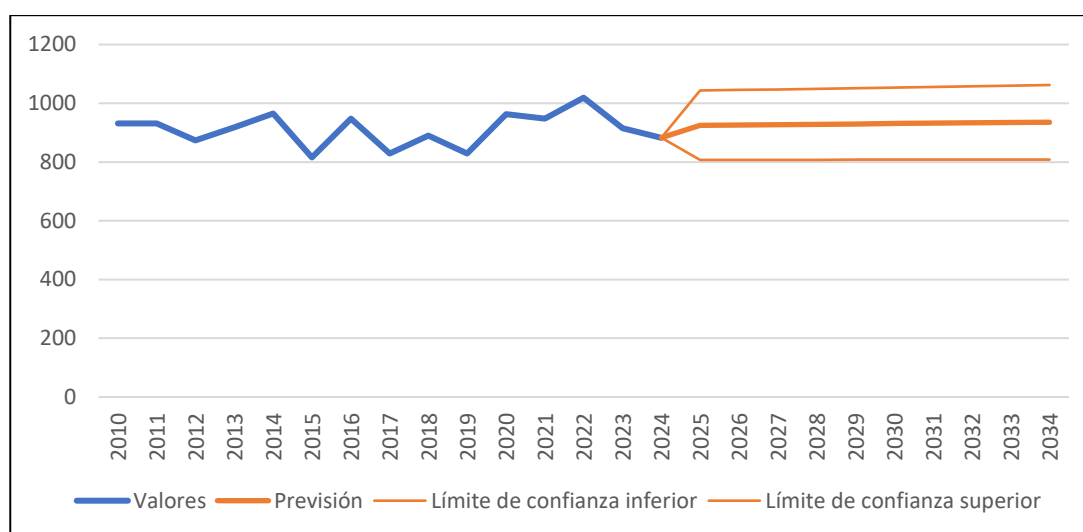


Gráfico 4.2 Precio mayorista pronosticado del tomate de primera de la región de Valparaíso

En la herramienta “Previsión” se impuso que no existía estacionalidad puesto que los datos son anuales y no mensuales, entonces Excel realizó un pronóstico en donde no detectó tendencia, por lo que el pronóstico quedó reducido a un suavizamiento exponencial

simple, con un alfa igual a 0,13 lo que significa que el pronóstico le da más ponderación a las observaciones históricas que a las recientes. Por otro lado, la herramienta previsión entrega por defecto un intervalo de confianza del 95%, asumiendo que el precio se distribuye normal, sin embargo, para considerar una distribución normal se deben tener más de 30 datos y sólo se cuenta con 15, entonces se asume que el pronóstico se distribuye como una t Student. Por lo tanto, los límites superior e inferior del pronóstico se ajustaron de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$DesvEst = \frac{0,5 (LCS - LCI)}{1,96} \quad (4.2)$$

$$t = INV.T.2C (0,05; 13) \quad (4.3)$$

$$LCS_t = Previsión + t \ DesvEst \quad (4.4)$$

$$LCS_t = Previsión - t \ DesvEst \quad (4.5)$$

Donde:

- *DesvEst*: Desviación estándar del pronóstico.
- *LCS*: Límite de confianza superior del pronóstico
- *LCI*: Límite de confianza inferior del pronóstico
- *t*: Función inversa de la distribución t Student con dos colas
- *LCS<sub>t</sub>*: Límite de confianza superior ajustado a un 95% de confianza para una distribución t Student
- *LCI<sub>t</sub>*: Límite de confianza inferior ajustado a un 95% de confianza para una distribución t Student

Entonces utilizando el intervalo de confianza del 95%, el pronóstico del precio por kilogramo para una distribución t Student se puede ver en la siguiente tabla

Tabla 4.19 Previsión del precio con un intervalo de confianza de 95% para una distribución t Student [CLP]

Año	$Precio_{prom}$	$LCI_t$	$LCS_t$
2025	925	795	1055
2026	926	796	1056
2027	927	797	1057
2028	929	798	1059
2029	930	800	1060
2030	931	801	1061
2031	932	802	1062
2032	933	803	1063
2033	934	804	1064
2034	935	805	1065

De la Tabla 3.4 se tiene que la producción anual del invernadero es de 180.576 [kg], por lo que se pueden obtener los ingresos promedios anuales proyectados a 10 años desde 2025 hasta 2034 con un intervalo de confianza de 95%, los cuales se presentan a continuación.

Tabla 4.20 Ingresos por venta pronosticados de tomate producido en el invernadero [CLP]

Año	$Ingreso_{promedio}$	$Ingreso (LCI_t)$	$Ingreso (LCS_t)$
2025	167.057.649	145.749.573	188.365.725
2026	167.260.852	145.781.625	188.740.080
2027	167.464.056	145.812.356	189.115.756
2028	167.667.259	145.841.776	189.492.742
2029	167.870.462	145.869.897	189.871.027
2030	168.073.665	145.896.728	190.250.603
2031	168.276.869	145.922.280	190.631.457
2032	168.480.072	145.946.563	191.013.581
2033	168.683.275	145.969.586	191.396.965
2034	168.886.479	145.991.360	191.781.597

#### 4.6. FLUJO DE CAJA

La implementación del invernadero se evaluó para un financiamiento del 50% y 75%, variando en cada caso la FBM utilizando los valores de (0,5), (0,7) y (0,8).

Para la evaluación económica del presente estudio se consideró una tasa de descuento (td) de 12%

Las variables económicas obtenidas del flujo de caja para los dos porcentajes de financiamiento fueron las siguientes.

Tabla 4.21 Resultados del flujo de caja para 50% de financiamiento

FBM	0,5	0,7	0,8
VAN	\$49.394.316	\$86.990.337	\$106.305.693
TIR	18%	23%	26%
PRI (años)	9	7	7
IVAN	22%	40%	48%

Tabla 4.22 Resultados del flujo de caja para un financiamiento de 75%

FBM	0,5	0,7	0,8
VAN	\$62.598.033	\$96.098.220	\$114.844.873
TIR	22%	28%	31%
PRI (años)	8	7	6
IVAN	28%	44%	52%

Observando los resultados se puede establecer que, el VAN aumenta a medida que aumenta el porcentaje de financiamiento y la FBM, de tal forma que, la mejor opción en términos económicos es realizar el proyecto con un 75% de financiamiento y un valor de FBM igual a 0,8.

El flujo de caja para un 75% de financiamiento y FBM igual a 0,8 se encuentra en el Anexo T.

#### 4.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad de la variación porcentual del VAN frente a la variación porcentual de las variables precio del tomate, tasa de descuento, costo de la biomasa y costo del diésel. De esta forma se logra obtener la elasticidad del VAN frente a las variables económicas mencionadas previamente, la cual se muestra a continuación para un 50% y 75% de financiamiento.

Tabla 4.23 Elasticidad del VAN para un 50% de financiamiento.

FBM	0,5	0,7	0,8
Elasticidad Precio_VAN	14,01	7,96	6,51
Elasticidad td_VAN	-2,33	-1,53	-1,34
Elasticidad Precio BM_VAN	-2,18	-1,74	-1,62
Elasticidad Precio Diesel_VAN	-4,10	-1,40	-0,76
Elasticidad Precio Inversión_VAN	-4,17	-2,37	-1,94

Tabla 4.24 Elasticidad del VAN para un 75% de financiamiento

FBM	0,5	0,7	0,8
Elasticidad Precio_VAN	10,31	7,14	6,03
Elasticidad td_VAN	-1,68	-1,26	-1,13
Elasticidad Precio BM_VAN	-1,54	-1,40	-1,47
Elasticidad Precio Diesel_VAN	-2,88	-1,13	-0,71
Elasticidad Inversión_VAN	-3,29	-2,14	-1,79

Observando las tablas 4.21 y 4.22 se puede afirmar que en general las elasticidades son relativamente menores cuando aumenta el porcentaje de financiamiento.

Por otro lado, dado un porcentaje de financiamiento, las elasticidades bajan cuando aumenta la FBM.

En general el proyecto presenta elasticidades del VAN mayores a 1 y una elasticidad muy alta al precio de venta, lo que le confiere un cierto nivel de riesgo, el cual se puede mitigar en cierta medida, utilizando un 75% de financiamiento y una FBM de 0,8.

## 4.8. ANÁLISIS DE RIESGO

Como ya se vio en la sección anterior, el VAN es altamente sensible al precio, lo que le confiere incertidumbre a la obtención de dicho indicador, razón por la cual se realiza en Excel un análisis de riesgo mediante una simulación de Montecarlo con 5 mil iteraciones en el cálculo del VAN para ver la probabilidad de que el proyecto tenga un VAN negativo o un IVAN menor a 50%, debido a que, al ser un proyecto tecnológico agrícola, se considera que el inversionista puede exigir un IVAN mayor al 50% para aprobarlo.

Para realizar la simulación de Montecarlo del VAN utilizando Excel, en primer lugar, se definió al precio como variable aleatoria con distribución t Student con un intervalo de confianza del 95%, tal como se puede ver en la siguiente expresión.

$$Precio = Precio_{prom} + DesvEst [INV.T(0,25 + Aleatorio( ) 0,95); 13] \quad (4.6)$$

Donde:

- La desviación estándar del precio (DesvEst) mediante la ecuación (4.2)
- INV.T: Función de Excel que devuelve el inverso de la t Student. de cola izquierda
- 13 son los grados de libertad.

Posteriormente se realizan las 5.000 iteraciones para el cálculo del VAN, utilizando la herramienta “Tabla de datos” de Excel. De esta forma los resultados obtenidos se pueden ver en el siguiente histograma.

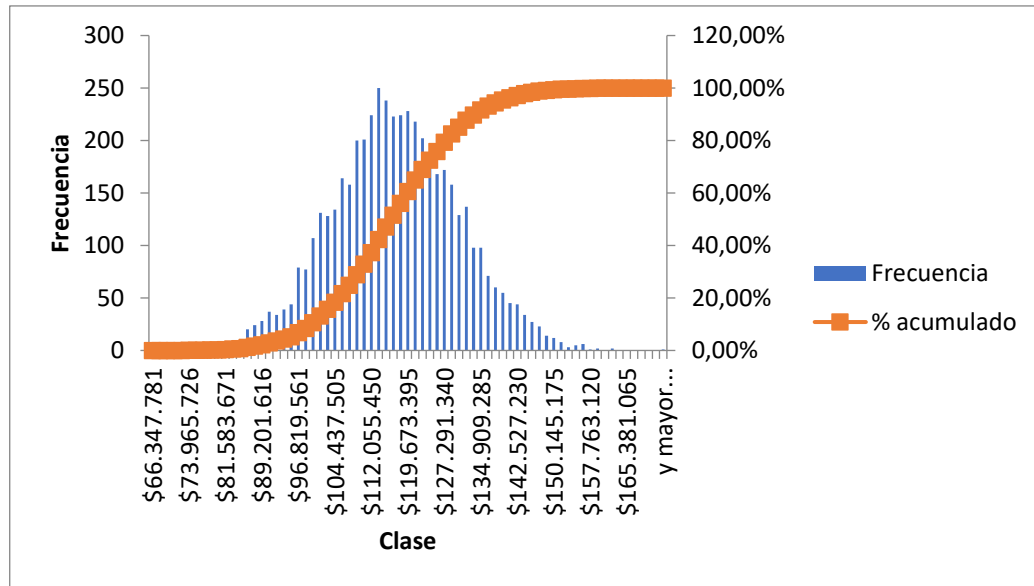


Gráfico 4.3 Histograma de frecuencia de la simulación de Montecarlo para el VAN

La tabla de datos del Gráfico 4.3 se puede ver en el Anexo V, en donde se puede constatar que:

- La probabilidad de que el IVAN sea menor a 50% es de 28,6%.
- La probabilidad de que el IVAN sea menor a 30% es cero.

## CONCLUSIÓN

Como primera conclusión, se puede afirmar que es factible económicamente instalar un invernadero con climatización automatizada dentro del Valle Central, donde la mejor opción es realizar el proyecto con un 75% de financiamiento y una fracción de biomasa (FBM) de 0,8.

Se descarta la utilización de colectores solares, debido a que una cantidad razonable de éstos técnicamente no logra entregar la suficiente potencia de calefacción requerida por el invernadero y la inversión en el termotanque es demasiado alta. El uso de colectores solares está más acotado a trabajar con temperaturas para calentar el suelo bajo tierra, las cuales son mucho menores que las que entrega una caldera.

No se justifica económicamente la instalación de los paneles fotovoltaicos, puesto que el consumo en energía eléctrica para las bombas y ventiladores no era un costo significativo en relación con el total de costos operacionales y el ahorro que significaba su instalación no compensaba la inversión que se calculó.

En el estudio se determinó que el VAN era muy sensible a las fluctuaciones del precio de venta y en menor grado al precio de la biomasa, sin embargo, el precio del tomate de primera para el mercado mayorista es relativamente estable, aunque hay que tener presente que frente a cualquier contingencia que haga bajar los precios, los ingresos se van a ver afectados notoriamente. En menor grado el alza del precio de la biomasa podría generar los mismos efectos.

Se puede considerar que el riesgo del proyecto es relativamente bajo, debido a que tiene una probabilidad igual a cero de tener un IVAN menor que 30%. No obstante, al ser un proyecto tecnológico agrícola de alta inversión, con un PRI de 6 años, el inversionista podría exigir un IVAN mayor a 50% y en este caso la probabilidad de que eso no ocurriese es de 28,6%, lo que implicaría que existiría un cierto nivel de riesgo asociado al proyecto.

La principal inversión que hay que realizar en el proyecto son los costos asociados a todo el sistema de calefacción, principalmente las calderas. En segundo lugar, está la inversión en la estructura del invernadero incluida su instalación.

El principal costo operacional anual es la compra de biomasa y diésel, el cual

representa aproximadamente el 58% del total de dicho tipo de costos.

## REFERENCIAS

- Abdel-Ghany, A., & Al-Helal, I. (2011). Analysis of solar radiation transfer: A method to estimate the porosity of a plastic shading net. *Energy Conversion and Management*, 52(3), 1755-1752.
- Abdel-Ghany, A., Picuno, P., Al-Helal, I., Alsadon, A., Ibrahim, A., & Shady, M. (2015). Radiometric Characterization, Solar and Thermal Radiation in a Greenhouse as Affected by Shading Configuration in an Arid Climate. *Energies*, 13928-13937.
- Al-Helal, I., & Abdel-Ghany, A. (2010). Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: Optical properties and evaluation. *NJAS — Wageningen Journal of Life Sciences*, 125–132.
- Al-Helal, I., & Abdel-Ghany, A. (2011). Measuring and evaluating solar radiative properties of plastic shading nets. *Solar Energy Materials and Solar Cells. Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 636-643.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Estudio FAO riego y drenaje. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., & Antúnez, A. (2017). *Manual de cultivo de tomate bajo invernadero*. (A. Torres, Ed.) Santiago, Chile: Instituto de investigaciones agropecuarias.
- Banco Estado. (2024). *bancoestado*. Obtenido de <https://www.bancoestado.cl/bancoestado/inteditorformularios/genera.asp?datos=152>
- Buena Caldera. (s.f.). *Pellet*. Obtenido de Buena Caldera: <https://www.buenacaldera.cl/productos/pellet>
- Castellano, S., & Russo, G. (2008). Radiometric properties of greenhouse covering materials. *Biosystems Engineering*, 423-438.
- Comisión Nacional de Energía. (2007). *GUÍA PARA EVALUACIÓN AMBIENTAL ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES*. Santiago: CNE.
- Dirección Meteorológica de Chile. (6 de Enero de 2024). *Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos*. Obtenido de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>

- Dominguez, F., Cejudo, J., Carrillo, A., & Ruivo, C. (2012). Design of solar thermal systems under uncertainty. *Energy and Buildings*, 474-484.
- Donatelli, M., Bellocchi, G., & Carlini, L. (2006). Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. *Europ. J. Agronomy*, 24, 186-192. doi:10.1016/j.eja.2005.07.005
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Crop Water Requirements*. Estudio FAO: riego y drenaje. Obtenido de <https://www.fao.org/documents/card/es?details=6bae3071-%2f>
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons.
- Elías Castillo, F., & Castellví Sentís, F. (1996). *Agrometeorología* (1 ed.). Madrid: Mundi-Prensa.
- Equipo Redagícola. (s.f.). *Redagícola*. Obtenido de <https://redagricola.com/las-cifras-actualizadas-del-sector-hortalicero-en-chile/>
- Escobedo-Bretado, J., & Martín-Domínguez, I. (2016). Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo. *Revista Aplicaciones de la Ingeniería*, 1-15.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración de cultivo* (Vol. 56). Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje.
- Fatnassi, H., Boulard, T., & Bouirden, L. (2013). Development, validation and use of a dynamic model for simulate the climate conditions in a large scale greenhouse equipped with insect-proof nets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 54-61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.008>.
- Flores Ortega, A., Martínez Soto, G., & Quiroz Ramírez, J. (2012). Predicción de la transmitancia de un invernadero con techo removible. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 743-746.
- García Solé, J., Bausá, L., & Jaque, D. (2005). *An introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids*. John Wiley & Sons.
- Garzoli, K., & Blackwell, J. (1987). An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. *J. Agric. Engng Res*, 36, 75-85. doi:[https://doi.org/10.1016/0021-8634\(87\)90114-4](https://doi.org/10.1016/0021-8634(87)90114-4)
- Gaxiola Carrasco, H. (2010). Importancia de Sinaloa y México en la agricultura protegida.

*Revista Ciencia y Universidad*, 29 - 69.

Generadoras de Chile;. (2023). *Generadoras de Chile*. Recuperado el 15 de Mayo de 2023, de [generadoras.cl](http://generadoras.cl)

González A., M. (2004). *Producción de Hortalizas en Invernadero*.

González, M. H., Rodríguez Muñoz, N. A., Escobedo Bretado, J., & Martín Domínguez, I. (Marzo de 2017). Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. *Revista de Innovación Sistemática*, 1(1), 33-45.

Guevara, J. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*, XXII(31), 31-72. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/721/72103103.pdf>

Harnois Industries. (6 de Enero de 2024). *Harnois Industries*. Obtenido de <https://www.harnois.com/es/invernaderos/tecnologias/>

Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. *Horticultura*, 18-26.

Hollman, J. (1992). *Heat Transfer*. Nueva York: McGraw-Hill.

Honsberg, C., & Bowden, S. (8 de Enero de 2024). *PVEDUCATION*. Obtenido de <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-time>

Horticom. (2025). *Horticom*. Recuperado el Mayo de 2025, de <https://www.horticom.com/empresas/>

*HortiCrece*. (s.f.). Obtenido de <https://www.horticece.cl/img/proyectos/1.pdf>

<https://www.miilkiiagrow.com/es/>. (9 de Junio de 2025). <https://www.miilkiiagrow.com/es/>. Obtenido de <https://www.miilkiiagrow.com/es/news/understanding-multi-span-greenhouses-and-their-functionality/>

INE. (2009). *LAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS EXPLOTACIONES. VII CENSO AGROPECUARIO Y FORESTAL 2006-2007*. Santiago de Chile: INE.

INE. (s.f.). *INE*. Recuperado el 23 de Abril de 2025, de <https://www.ine.gob.cl/>

Informes de expertos. (2023). *Informes de Expertos*. Obtenido de <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-frutas-y-verduras-en-chile>

Jensen, M., Burman, R., & y Allen, R. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. New York: American Society of Civil Engineers.

- Kittas, C., Draoui, B., & Boulard, T. (1995). Quantification du taux d'aération d'une serre á ouvrant continu en toiture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77, 95-111. doi:10.1016/0168-1923(95)02232-m
- Lira, G. (2025). *Precio Bencina*. Obtenido de Autofact: <https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/precio-bencina#toc-index-1>
- Lobos, P., Vega, B., & Carrasco, J. (2022). Producción de hortalizas bajo invernadero. En J. Carrasco Jiménez, P. Abarca Reyes, C. Aguirre Aguilera, J. Carrasco Jiménez, P. Abarca Reyes, & C. Aguirre Aguilera (Edits.), *Manual de buenas prácticas y lecciones aprendidas para adaptación al cambio climático. Para la agricultura de secano de la Región de O'Higgins* (págs. 125-126). Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68837>
- López, R. (13 de 03 de 2025). *Actualidad Empresas*. Obtenido de Tecnología Hortícola: <https://www.tecnologiahorticola.com/inveurop-material-mejor-para-cubiertas-invernadero/#:~:text=Pl%C3%A1sticos%2C%20pel%C3%ADcula%20de%20polietileno,vida%20%C3%BAtil%20hasta%204%20a%C3%B1os>.
- Mills, A. (1997). *Transferencia de calor*. Nueva York: Mcgraw-Hill.
- Ministerio de Energía. (s.f.). *Generación Distribuida*. Obtenido de Ministerio de Energía: <https://generaciondistribuida.minenergia.cl/preguntas-frecuentes#:~:text=Si%20una%20casa%20en%20Calama,en%20alta%20tensi%C3%B3n%20de%20distribuci%C3%B3n>.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (2023). *Ministerio de Energía, Gobierno de Chile*. Recuperado el 15 de Mayo de 2023, de <https://energia.gob.cl/indicadores-ambientales-factor-de-emisiones-gei-del-sistema-electrico-nacional>
- Molina Monje, A., & Martínez, F. (2017). *Modelo de Generación Fotovoltaica*. Santiago: Departamento de Geofísica - Universidad de Chile.
- MONTERO, J., & ANTÓN, A. (1994). Evolución tecnológica de los invernaderos españoles. *Acta Horticulturae*, 357(15-27). doi:10.17660/ActaHortic.1994.357.1
- Mora, D., Abarca, P., Olgún, J., Carrasco, J., Aguirre, C., & Silva, L. (2016). Construcción de invernadero tipo capilla. En D. Mora, H. Uribe, N. Jiménez, L. Silva, J. Carrasco, P. Abarca, . . . J. Riquelme, & J. Carrasco (Ed.), *Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias*. (Vol. 321, pág. 184). Rengo, Chile: INIA.

- Nijskens, J., Deltour, J., Nisen, A., & Coutisse, S. (1984). Radometric and thermal properties of plastic materials. *Acta Horticulturae*, 154, 33-42. doi:10.17660/ActaHortic.1989.245.7
- Nijskens, J., Deltour, J., Nisen, A., & Coutisse, S. (1984a). Agronomic and radiometric characterization of greenhouse materials. *Acta Horticulturae*, 148, 663-673. doi:10.17660/ActaHortic.1984.148.86
- Nijskens, J., Deltour, J., Nisen, A., & Coutisse, S. (1984b). Propriétés radiométriques des matériaux plastiques. *Acta Horticulturae*, 154, 33-42. doi:10.17660/ActaHortic.1984.154.2
- Nisen, A., & Coutisse, S. (1981). Photometric properties of double wall plastics used as covering for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 115, 85-97. doi:10.17660/ActaHortic.1981.115.9
- NOVAGRIC. (2024). *NOVAGRIC*. Obtenido de <https://novagric.com/>
- Orgaz, F., Fernández, M. D., Bonachela, S., Gallardo, M., & Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*, 72(2), 81-96. doi:10.1016/j.agwat.2004.09.010
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J., & Boulard, T. (1996). Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3), 219-227. doi:10.1006/jaer.1996.0023
- Peet, M., & Welles, G. (2005). Greenhouse tomato production. En *Tomatoes* (págs. 257-304). CABI Publishing.
- Pérez Vega, C., Ramírez Arias, J., & López Cruz, I. (2016). Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 493-506.
- Plant Production and Protection Division. (2002). *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. (FAO, Ed.) Roma. Obtenido de <https://www.fao.org/documents/card/es?details=31b74a22-0646-5845-8bae-59b507b29c7f%2f>
- Plasencia, E., Matos, L., Posadas, A., & Cabrera, C. (2007). Estimación horaria de la irradiancia solar total extraterrestre. *Revista del Instituto de Investigaciones*

*FIGMMG*, 10(19), 72-77.

Polyanskiy, M. N. (2024). *Refractiveindex.info database of optical constants*. Obtenido de RefractiveIndex.INFO:

<https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=polyethylene&page=David>

Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M. C., Tyukavina, A., Zalles, V., Ahmad, K., . . .

Cortez, J. (2022). Global maps of cropland extend and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nature Food*(3), 19-28. doi:<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00429-z>

Qualitas Agroconsultores. (2009). *Estudio de caracterización de la pequeña agricultura a partir del VII censo agropecuario y forestal*.

Reda, I., & Andreas, A. (2004). Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy*, 577-589.

Reyes Rosas, A., Molina Aiz, F., Valera, D., López, A., & Khamkure, S. (2017). Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch. *Computers and Electronics in Agriculture*, 9-28.

Ruelas Islas, J. d., Rubiños Panta, J. E., Peinado Fuentes, L. A., Mendoza Pérez, C., Martínez Ruiz, A., & Escobosa García, I. (2022). Tomato water consumption in the greenhouse according to the number of stems. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.

Ruiz, R., & Martínez, J. (2020). *Informativo INIA N°56: Los invernaderos en la agricultura familiar campesina*. INIA. Chillán: Informativo INIA Quilamapu. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/67177>

Saavedra, G. (2017). SISTEMAS DE PRODUCCIÓN. En G. Saavedra, F. Corradini, A. Antúnez, S. Felmer, E. P., & P. Sepúlveda, *Manual de producción de lechuga* (págs. 33-44). Santiago: INIA. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6703>

Salas, M. (Septiembre de 2009). Control y optimización del seguimiento solar con dos grados de libertad para mejora del aprovechamiento energético. Madrid.

Salinas Ballenova, M., Salinas Anguita, C., & Cartes Salinas, S. (2021). *Resultado y Lecciones en Manejo integrado de plagas en invernaderos hortícolas*. (G. Casanova, Ed.) Santiago: Serie experiencias de innovación para el emprendimiento agrario. Obtenido de [https://opia.fia.cl/601/articles-120595\\_archivo\\_01.pdf](https://opia.fia.cl/601/articles-120595_archivo_01.pdf)

- Schmidt, R. (2012). *Aplicaciones de energía solar fotovoltaica: Diseño, Implementación y Experiencias*. Arica: CODING.
- SensorGo. (2025). *SensorGo*. Obtenido de <https://sensorgo.mx/velocidad-del-viento/>
- Soler & Palau. (s.f.). *Hojas técnicas: La climatización de invernaderos*. Recuperado el Mayo de 2025, de Soler & Palau: <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-la-climatizacion-de-invernaderos/>
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management*. Wageningen: Agricultural University Wageningen. Obtenido de <https://edepot.wur.nl/202121>
- Statista. (s.f.). *Statista*. Recuperado el 10 de Mayo de 2025, de [https://www.statista.com/outlook/cmo/food/vegetables/fresh-vegetables/chile?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.statista.com/outlook/cmo/food/vegetables/fresh-vegetables/chile?utm_source=chatgpt.com)
- Swinbank, W. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*(89), 339-348. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>
- Teitel, M. (2007). The effect of screened openings on greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 159-175.
- Tesi, R. (2001). *Medios de protección para la hortoflorofruticultura y viverismo*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Tetens, O. (1930). Uber einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift fur Geophysik*, 6, 297-309.
- Uribe Cifuentes, H., & Ruiz Muñoz, R. (2019). *Riego y Evapotranspiración*. Santiago: INIA.
- Uribe, H., & Ruiz, R. (2019). Riego y Evapotranspiración. En C. Campos, D. Arribillaga, G. Chacón, H. Uribe, I. Acuña, J. Salvo, . . . Iraira, S., *Descripción y usos de la red de agrometeorología INIA*. Santiago: INIA. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/6836>
- Valera, D., Molina, F., & Álvarez, A. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*. Madrid: IDAE.

# ANEXOS

## ANEXO A: MODELO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL INVERNADERO

El modelo para obtener las variables dimensionales de cada módulo del invernadero multicapilla que se pueden visualizar en la Figura 2.7, está descrito mediante las ecuaciones que se muestran a continuación.

En primer lugar, como condición de diseño se tiene que la magnitud del volumen de un invernadero debe ser 3 veces el valor de la magnitud de la superficie de suelo cubierta. (Mora, et al., 2016).

$$Vm = 3 Wm Lm \quad (A.1)$$

Donde:

- $Vm$ : Volumen del módulo [ $m^3$ ]

La expresión del volumen del invernadero después de un ordenamiento algebraico queda de la siguiente forma.

$$Vm = Wm Lm \left( \frac{hp}{2} + \frac{h2 + h1}{4} \right) \quad (A.2)$$

El valor del volumen del invernadero multicapilla tipo DAM está dado por la siguiente expresión.

$$V = N Vm \quad (A.3)$$

Donde

- $V$ : Volumen del invernadero multicapilla tipo DAM.
- $N$ : Número de módulos del invernadero multicapilla tipo DAM

La cantidad de módulos del invernadero multicapilla tipo DAM está dada por la siguiente expresión.

$$N = \frac{S_s}{W_m L_m} \quad (A.4)$$

Por condición de diseño se tiene que la pendiente  $Tg(\alpha)$  del invernadero multicapilla tipo DAM debe estar entre 15 y 30% (Plant Production and Protection Division, 2002).

$$h_2 - h_1 = \frac{W_m}{2} Tg(\alpha) \quad (A.5)$$

Por condición de diseño se tiene que el valor del área total de las ventanas del invernadero multicapilla debe estar entre el 15 y el 25% de la superficie del suelo cubierto (Plant Production and Protection Division, 2002).

$$S_v = 15\% S_s \quad (A.6)$$

$$S_v = S_{vc} + S_{vl} \quad (A.7)$$

Donde:

- $S_v$ : Superficie total de las ventanas del invernadero multicapilla tipo DAM.
- $S_{vc}$ : Superficie total de las ventanas cenitales del invernadero multicapilla tipo DAM.
- $S_{vl}$ : Superficie total de las ventanas laterales del invernadero multicapilla tipo DAM.

En el presente estudio se estableció como primer criterio de diseño que la cantidad de superficie total de ventanas cenitales fuese igual a la superficie total de ventanas laterales.

$$S_{vc} = S_{vl} \quad (A. 8)$$

Como segundo criterio de diseño se estableció que el largo de cada ventana cenital y de cada ventana lateral fuese el 80% de del largo del invernadero multicapilla tipo DAM.

$$L_{vl} = 0,8 L \quad (A. 9)$$

$$L_{vc} = 0,8 L \quad (A. 10)$$

Donde:

- $L_{vl}$ : Largo de una ventana lateral
- $L_{vc}$ : Largo de una ventana cenital
- $L$ : Largo del invernadero multicapilla tipo DAM ( $L = L_m$ )

La altura de la ventana lateral y cenital queda definida según la siguiente expresión.

$$H_{vl} = \frac{S_{vl}}{2 L_{vl}} \quad (A. 11)$$

$$H_{vc} = \frac{S_{vc}}{N L_{vc}} \quad (A. 12)$$

Donde:

- $H_{vl}$ : Altura ventana lateral
- $H_{vc}$ : Altura ventana cenital

La altura de la ventana cenital está definida por la siguiente expresión.

$$h_2 - h_1 \approx H_{vc} \quad (A. 13)$$

**ANEXO B:** MAGNITUD DE LAS SUPERFICIES DE UN MÓDULO DEL INVERNADERO

En este anexo se presenta el cálculo de las magnitudes de las superficies de un módulo del invernadero multicapilla tipo DAM en función de las dimensiones del invernadero definidas en la sección 2.7 y las superficies de un módulo que están definidas en la sección 2.8.

$$Sm_1 = Sm_2 = \frac{Wm}{4} (2 hp + h1 + h2) \quad (B.1)$$

$$Sm_3 = Lm (h2 - h1) \quad (B.2)$$

$$Sm_4 = Lm \sqrt{(h1 - hp)^2 + \left(\frac{Wm}{2}\right)^2} \quad (B.3)$$

$$Sm_5 = Lm \sqrt{(h2 - h1)^2 + \left(\frac{Wm}{2}\right)^2} \quad (B.4)$$

$$Sm_6 = Sm_7 = Lm hp \quad (B.5)$$

## ANEXO C: VECTOR UNITARIO DE LA POSICIÓN DEL SOL

Para localizar la posición del Sol en el cielo en un momento y lugar específicos, se utiliza el sistema de coordenadas horizontales. Este sistema tiene como referencia el observador y su horizonte local, donde las dos coordenadas fundamentales en este sistema son la elevación y el acimut.

La elevación o altitud solar es el ángulo que forma el Sol con respecto al horizonte del observador. Se mide en el plano vertical que contiene al observador y la posición del Sol. Su valor varía entre  $0^\circ$ , cuando el Sol está en el horizonte (amanecer o atardecer), y  $90^\circ$ , cuando el Sol se encuentra en el cenit, es decir, en la posición más alta del cielo sobre la vertical del observador (Duffie & Beckman, 2013).

El acimut solar es el ángulo en el plano horizontal entre la dirección del norte geográfico y la proyección del Sol sobre dicho plano. Generalmente se mide en el sentido de las agujas del reloj, desde el norte hacia el este. Así, el Norte corresponde a  $0^\circ$ , el Este a  $90^\circ$ , el Sur a  $180^\circ$  y el Oeste a  $270^\circ$  (Reda & Andreas, 2004). Este ángulo determina la dirección horizontal en la que se observa el Sol.

Para obtener el valor del acimut y la elevación solar en un momento dado, se deben determinar parámetros relativos al movimiento aparente del sol en el cielo. Estos parámetros están asociados al día juliano del año, la hora del día, la latitud y la longitud del lugar donde se emplace el invernadero. A continuación, se presentan las ecuaciones para calcular dichos parámetros.

En primer lugar, se obtiene el ángulo diario mediante la siguiente expresión (Plasencia, et al., 2007).

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365}(d - 1) \quad (C. 1)$$

Donde  $d$  es el número del día del año contado en forma correlativa desde  $d = 1$  correspondiente al primero de enero.

En segundo lugar, se calcula la declinación solar  $\delta$  [rad] evaluando  $d$  en la siguiente expresión (Plasencia, et al., 2007).

$$\delta = 23,45^\circ \sin \left[ \left( \frac{2\pi}{365} \right) (284 + d) \right] \quad (C. 2)$$

En tercer lugar, se calcula la ecuación de tiempo  $E_t$  [minutos] la cual está en evaluando  $\Gamma$  en la siguiente expresión (Plasencia, et al., 2007).

$$E_t = 229,18 \left( \begin{array}{l} 7,5 \cdot 10^{-5} + 1,87 \cdot 10^{-5} \cos \Gamma - 3,208 \cdot 10^{-2} \sin \Gamma - \\ + 1,462 \cdot 10^{-2} \cos 2\Gamma - 4,09 \cdot 10^{-2} \sin 2\Gamma \end{array} \right) \quad (C. 3)$$

En cuarto lugar, se calcula en ángulo solar horario  $\omega$  mediante la siguiente expresión (Honsberg et al., 2024).

$$\omega = 15^\circ \left( LT + \frac{4 (L_{loc} - 15^\circ \Delta T_{UTC}) + E_t}{60} - 12 \right) \quad (C. 4)$$

Donde  $LT$  es la hora local,  $L_{loc}$  es la longitud local,  $UTC$  es el tiempo universal coordinado [hr] y  $\Delta T_{UTC}$  es la diferencia entre el UTC de Chile y UTC de Greenwich. Para Chile  $\Delta T_{UTC} = -3$  [hr] en verano y  $-4$  [hr] en invierno y  $L_{loc} = -70,70^\circ$ .

La determinación de la declinación y el ángulo horario, además de la latitud, permiten calcular la elevación solar ( $\alpha$ ) mediante la siguiente expresión (Honsberg & Bowden, 2024)

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (C. 5)$$

Donde  $\varphi$  es la latitud del lugar de emplazamiento del invernadero en San Felipe, la cual es igual a  $-32,75^\circ$ .

La determinación del acimut ( $\psi$ ) depende de la declinación, la latitud, el ángulo horario y la elevación solar y se calcula mediante la siguiente expresión (Honsberg & Bowden, 2024).

Si  $\omega < 0$ :

$$\psi = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (C.6)$$

Si  $\omega > 0$ :

$$\psi = 2\pi - \cos^{-1} \left( \frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos \omega}{\cos \alpha} \right) \quad (C.7)$$

Es importante señalar que todos los argumentos de las funciones sin y cos deben estar en radianes. En este sentido los parámetros que están en grados deben pasar a radianes multiplicando su valor por  $(\pi/180^\circ)$ .

Posteriormente se puede calcular el ángulo cenital  $\theta_z$ , el cual es el complemento del ángulo de elevación solar mediante la siguiente expresión.

$$\theta_z = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (C.8)$$

Utilizando el ángulo cenital ( $\theta_z$ ) y el acimut ( $\psi$ ), se pueden obtener las coordenadas cartesianas del vector unitario de los rayos solares de la radiación directa, estableciendo el Norte como el eje Y positivo, el Este como el eje X positivo y el Cenit como el Eje Z positivo.

A continuación, en la Figura C.1 se presentan el acimut ( $\psi$ ), la elevación solar ( $\alpha$ ) y el ángulo cenital ( $\theta_z$ ).

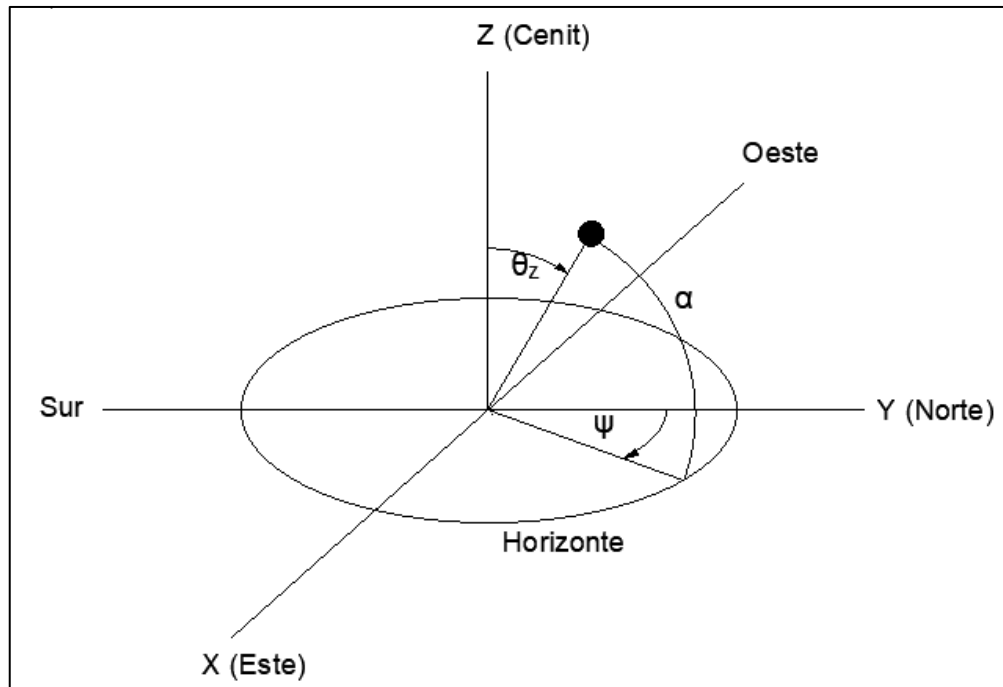


Figura C.1 Acimut, elevación y ángulo cenital de la posición del sol en el cielo.

A continuación, se definen las coordenadas cartesianas del vector unitario de la posición del sol.

$$r = r_x (\hat{i}) + r_y (\hat{j}) + r_z (\hat{k}) \quad (C.9)$$

Donde  $r$  es el vector unitario de la posición del Sol en el cielo y en donde cada una de sus componentes se puede determinar de la siguiente forma:

$$(r_x \ r_y \ r_z) = (\sin \theta_z \sin \psi \ \sin \theta_z \cos \psi \ \cos \theta_z) \quad (C.10)$$

## **ANEXO D: VECTOR NORMAL UNITARIO DE LAS SUPERFICIES DEL INVERNADERO**

La orientación del invernadero multicapilla tipo DAM va a determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre todas las superficies que lo componen.

En la sección 2.10 se explica que la mejor orientación del invernadero es en dirección Noroeste – Sureste porque de esta forma se evita que el viento predominante norte de otoño – invierno y el viento predominante sur de primavera- verano incidan de forma perpendicular sobre las paredes laterales y al mismo tiempo se puede aprovechar la mayor cantidad de luz solar posible.

Para obtener los vectores normales de cada superficie del invernadero multicapilla tipo DAM, basta con obtener los vectores normales de superficie de uno de sus módulos. Para tal efecto, a continuación, se presenta la Figura D.1, en donde se identifica cada una de las superficies de un módulo y los vértices de cada una de las aguas del techo.

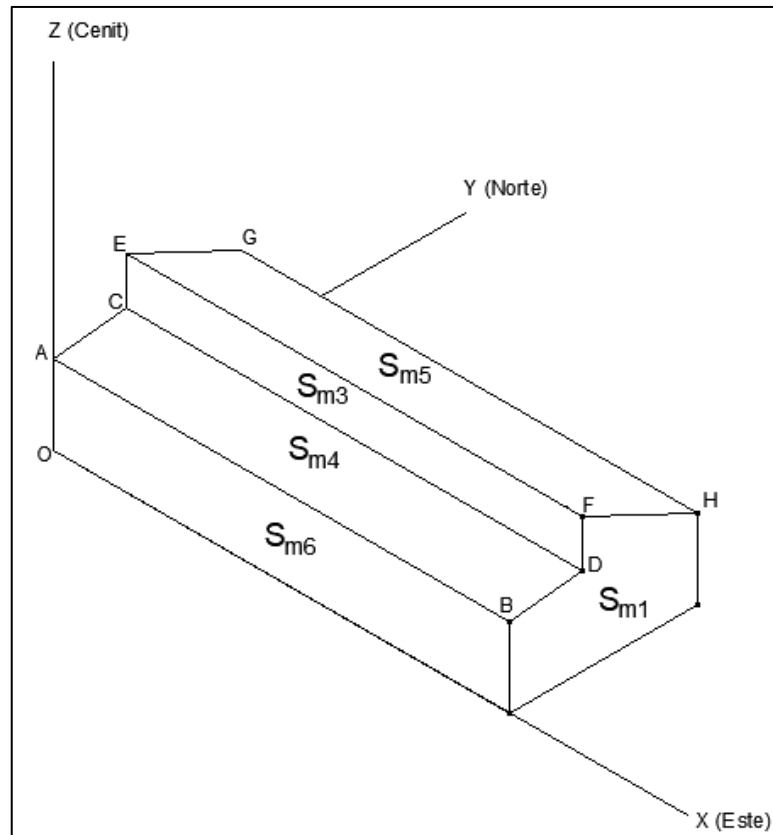


Figura D.1 Superficies del módulo de un invernadero multicapilla tipo DAM

Observando la Figura D.1 y la Figura 3.7, los vértices de la superficie Sm4 y Sm5 quedan definidos como:

- $A = (0, 0, h_p)$ ; Donde  $h_p$  es la altura de S6.
- $B = (L_m, 0, h_p)$ ; Donde  $L_m$  es el largo del módulo
- $C = (0, W_m/2, h_1)$ ; Donde  $W_m$  es el ancho del módulo
- $D = (L_m, W_m/2, h_1)$
- $E = (0, W_m/2, h_2)$
- $F = (L_m, W_m/2, h_2)$
- $G = (0, W_m, h_p)$

- $H = (Lm, Wm, hp)$

La orientación del módulo está dada por la dirección del vector normal de la superficie  $Sm_1$ . Esto implica que el módulo del invernadero de la Figura 3.12 está en una orientación Este – Oeste, de tal forma que el vector unitario de sus superficies son los siguientes:

- $n_1 = (1, 0, 0)$
- $n_2 = (-1, 0, 0)$
- $n_3 = (0, -1, 0)$
- $n_7 = (0, 1, 0)$
- $n_6 = (0, -1, 0)$

Utilizando los vértices de S4 y S5 se pueden construir los vectores que permiten obtener  $n_4$  y  $n_5$ , tal como se muestra a continuación.

$$n_4 = \frac{\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}}{\|\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC}\|} \quad (D. 1)$$

$$n_5 = \frac{\overrightarrow{EF} \times \overrightarrow{EG}}{\|\overrightarrow{EF} \times \overrightarrow{EG}\|} \quad (D. 2)$$

Entonces para lograr la orientación Noroeste – Sureste se debe aplicar una matriz de rotación en torno al eje Z a los vectores normales unitarios de cada superficie del módulo.

A continuación, se presenta la matriz de rotación en torno al eje Z.

$$Rz(-45^\circ) = \begin{pmatrix} \text{Cos}(-45^\circ) & -\text{Sen}(-45^\circ) & 0 \\ \text{Sen}(-45^\circ) & \text{Cos}(-45^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (D. 3)$$

Los vectores unitarios rotados en  $-45^\circ$  se obtendrían de la siguiente forma:

$$n'_j = Rz(-45^\circ) n_j \quad (D.4)$$

Donde:

- $n'_j$ : Es un vector normal unitario ( $n_j$ ) rotado en  $-45^\circ$  en torno al eje Z.
- $n_j$ : Es el vector unitario de una superficie “j” del módulo orientado en la dirección Este – Oeste, con  $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

## **ANEXO E: TRANSMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD DE LA CUBIERTA A LA RADIACIÓN DIRECTA**

### **E.1. Ley de Snell**

A continuación, se presenta la ley de Snell, la cual es utilizada para obtener el ángulo de refracción de la radiación directa que incide sobre la cubierta.

$$n1 * \sin \theta = n2 * \sin \theta r \quad (E. 1)$$

Donde:

- $n1$ : Índice de refracción del aire
- $n2$ : Índice de refracción de la cubierta
- $\theta$ : Ángulo de incidencia de la radiación directa sobre cada superficie
- $\theta r$ : Ángulo de refracción en el interfaz aire - polímero

### **E.2. Ecuaciones de Fresnel**

En la entrada de la radiación directa a la cubierta del invernadero, el rayo incide sobre la interfaz aire – polímero, para refractarse e incidir sobre la superficie interior de la cubierta saliendo de ésta a través de la interfaz polímero – aire.

A continuación, se presentan las ecuaciones de Fresnel para determinar la reflectividad y transmisividad a la radiación directa en la interfaz aire – polímero.

$$R_s = \left( \frac{n1 * \cos \theta - n2 * \cos \theta r}{n1 * \cos \theta + n2 * \cos \theta r} \right)^2 \quad (E. 2)$$

$$R_p = \left( \frac{n1 * \cos \theta r - n2 * \cos \theta}{n1 * \cos \theta r + n2 * \cos \theta} \right)^2 \quad (E. 3)$$

$$Rcb = 0,5 * (R_s + R_p) \quad (E. 4)$$

$$Tcb_e = 1 - Rcb \quad (E. 5)$$

Donde:

- $R_s$ : Reflectancia para la polarización del campo eléctrico de la radiación perpendicular al plano de incidencia.
- $R_p$ : Reflectancia para la polarización del campo eléctrico de la radiación paralela al plano de incidencia.
- $Rcb$ : Reflectancia de la radiación directa no polarizada en función del ángulo de incidencia sobre una superficie del invernadero
- $Tcb_e$ : Transmitancia a la radiación directa en función del ángulo de incidencia en la interfaz exterior aire-polímero.

Debido a que los índices de refracción de la ley de Snell para la interfaz exterior (aire – polímero) son iguales a los índices de refracción para la interfaz interior (polímero – aire), se tiene por simetría que:

$$Rcb_e = Rcb_i = Rcb \quad (E. 6)$$

Donde:

- $Rcb_i$ : Reflectividad del rayo en la salida de una superficie de la cubierta a través de la interfaz interior polímero – aire.

### E.3. Camino óptico interno del rayo solar incidente

El camino óptico consiste en la longitud efectiva que recorre el rayo solar incidente a través del espesor de la cubierta al refractarse.

A continuación, se define el camino óptico mediante la siguiente expresión:

$$L_{ef} = \frac{esp}{\cos \theta r} \quad (E. 7)$$

Donde:

- $L_{ef}$ : Longitud efectiva del rayo solar dentro de la superficie de la cubierta
- $esp$ : Espesor de la cubierta

#### E.4. Ley de Beer-Lambert.

Esta ley describe la atenuación exponencial de la intensidad luminosa al atravesar un medio homogéneo transparente (García Solé, Bausá, & Jaque, 2005).

$$Tc_{int} = \exp(-K(\lambda) * L_{ef}) \quad (E. 8)$$

Donde:

- $Tc_{int}$ : Transmisividad interna para un solo paso de la radiación directa a través de la cubierta.
- $K(\lambda)$ : Coeficiente de extinción, el cual depende de la longitud de onda  $\lambda$  y determina la absorción más la dispersión de la radiación en el interior de la cubierta.

#### E.5. Transmisividad de la cubierta a la radiación directa

La transmisividad total de cubierta a la radiación directa incidente a través de cada superficie de la cubierta del invernadero queda determinada por:

$$Tcb = (1 - Rcb)^2 * Tc_{int} \quad (E. 9)$$

Donde:

- $Tcb$ : Transmisividad total a la radiación directa que incide con un ángulo  $\theta$  sobre una superficie del invernadero.

El valor de  $K(\lambda)$ , de la ecuación (E.8), está determinado por la longitud de onda y el material de la cubierta. Al respecto, se tiene que la radiación solar tiene longitudes de onda de 300 hasta 2.500 nanómetros (Valera, et al, 2008) y que el material típicamente utilizado

por la pequeña empresa agrícola es el polietileno de baja densidad, tal como se señaló en la sección 3.11. Esto genera, según (Polyanskiy, 2024), que el coeficiente de extinción  $K(\lambda)$  sea igual a cero para la radiación solar que incide sobre una cubierta de polietileno, por lo que  $T_{c\_int}$  es igual a 1. Entonces aplicando lo previamente descrito a la ecuación (E.9) se tiene que:

$$T_{cb} = (1 - R_{cb})^2 \quad (E.10)$$

#### E.6. Absortividad de la cubierta a la radiación directa

La absortividad de la cubierta a la radiación directa se obtiene de la siguiente forma:

$$A_{cb} = 1 - (1 - R_{cb})^2 - R_{cb} \quad (E.11)$$

Donde:

- $A_{cb}$ : Absortividad a la radiación directa que incide con un ángulo  $\theta$  sobre una superficie del invernadero

## **ANEXO F: ABSORTIVIDAD y EMISIVIDAD DEL SUELO**

Se puede establecer una relación entre el IAF y el coeficiente de cultivo Kc para el tomate, mediante la siguiente expresión (Ruelas Islas, et al., 2022)

$$IAF = \frac{(Kc - 0,0249)}{0,2425} \quad (F. 1)$$

El coeficiente de cultivo Kc se define como un factor que representa las condiciones de suelo y de la gestión del cultivo, está tabulado y varía según la etapa de crecimiento de las plantas, tal como se puede ver a continuación (Allen, et al., 2006)

Tabla F.1 Coeficiente de cultivo del tomate según la etapa de crecimiento

Etapa de crecimiento	Kc
Inicial	0,6
Desarrollo	1,15
Floración	1,15
Maduración	0,8

En el estudio realizado por Valera et, al. (2008) hay una tabla de datos en donde se relaciona la absorptividad de las plantas a la radiación solar y a la radiación térmica con el IAF, lo que permitió establecer una relación lineal entre la absorptividad para los dos tipos de radiaciones y el IAF, tal como se muestra a continuación.

$$Ap_s = 0,078 IAF + 0,506 \quad (F. 2)$$

$$Ap_l = 0,098 IAF + 0,542 \quad (F. 3)$$

Donde:

- $Ap_s$ : Absorptividad de la planta a la radiación solar

- $A_{p\_l}$ : Absortividad de la planta a la radiación térmica

Para obtener la absortividad del suelo cubierto por el invernadero fue considerada la absortividad de las plantas, la transmisividad del cultivo según el IAF, la superficie cultivada y la superficie de los pasillos de tierra. De tal forma que la absortividad del suelo cubierto para la radiación solar y térmica están dadas por las siguientes expresiones, según lo establecido en el estudio de Reyes Rosas et al (2017).

$$Tp\_s = \exp(-ks \text{ IAF}) \quad (F. 4)$$

$$Tp\_l = \exp(-kl \text{ IAF}) \quad (F. 5)$$

$$Asc\_s = Ap\_s [(1 - Tp\_s) fp] + As\_s [Tp\_s fp + 1 - fp] \quad (F. 6)$$

$$Asc\_l = Ap\_l [(1 - Tp\_l) fp] + As\_l [Tp\_l fp + 1 - fp] \quad (F. 7)$$

$$fp = \frac{Sc \ Nc}{Ss} \quad (F. 8)$$

Donde:

- $Ss$ : Superficie de suelo cubierta por el invernadero. Es la superficie compuesta por el suelo sembrado (camellones) más el suelo de los pasillos.
- $Tp\_s$ : Transmisividad de las plantas a la radiación solar
- $Tp\_l$ : Transmisividad de las plantas a la radiación térmica
- $kl$ : Coeficiente de extinción a la radiación térmica
- $ks$ : Coeficiente de extinción a la radiación solar
- $Asc\_s$ : Absortividad del suelo cubierto por el invernadero a la radiación solar
- $Asc\_l$ : Absortividad del suelo cubierto por el invernadero a la radiación térmica
- $As\_s$ : Absortividad del suelo sembrado a la radiación solar, la cual tiene un valor

preestablecido.

- $A_{s\_l}$ : Absortividad del suelo sembrado a la radiación térmica, la cual tiene un valor preestablecido.
- $fp$ : Fracción del suelo sembrado con respecto al suelo total.
- $Sc$ : Superficie de cada camellón del invernadero
- $Nc$ : Número de camellones

La emisividad del suelo de radiación térmica está dada por la siguiente expresión en base a lo establecido en el estudio de Reyes Rosas, et al. (2017).

$$E_{sc} = A_{sc\_l} (T_{p\_l} fp + 1 - fp) \quad (F.9)$$

Donde:

- $E_{sc}$ : Emisividad del suelo del invernadero.

## **ANEXO G:** TEMPERATURA Y EMISIVIDAD DE LA ATMÓSFERA Y VELOCIDAD DEL VIENTO A 2 METROS DE ALTURA

La temperatura de emisión de energía de la atmósfera ( $T_{at}$ ) se puede estimar a partir de la siguiente expresión. (Swinbank, 1963).

$$T_{at} = f_n T_e + 0,0552 (1 - f_n) T_e^{1,5} \quad (G.1)$$

Donde:

- $T_e$ : Temperatura absoluta exterior en [K]
- $f_n$ : Factor de nubosidad, el cual es 1 para un cielo totalmente cubierto y 0 para cielos claros.

La emisividad de la atmósfera ( $E_{at}$ ), se puede calcular de acuerdo con la siguiente expresión (Baille, 1999).

$$E_{at} = 1 - 0,35 \exp\left(\frac{-10 pva_e}{T_e}\right) \quad (G.2)$$

Donde:

- $pva_e$ : Presión de vapor de agua en el aire exterior [hPa]

La presión de vapor del agua en aire exterior se puede obtener de la siguiente forma:

$$pva_e = pvs_e HR_e \quad (G.3)$$

Donde:

- $pvs_e$ : Presión de vapor saturado en el aire exterior [hPa]
- $HR_e$ : La humedad relativa exterior [%]

La presión de vapor saturado en el aire exterior ( $pvs_e$ ) se puede calcular mediante la siguiente expresión (Tetens, 1930).

$$pvs_e = 6,1078 \exp \left[ \frac{17,269 t_e}{(t_e + 237,3)} \right] \quad (G. 4)$$

Donde:

- $t_e$ : Temperatura del aire exterior [°C].
- La presión de vapor saturado de agua en el aire exterior ( $pvs_e$ ) está en [hPa]

La altura estándar de registro del viento es de 10 metros, entonces para ajustar los datos de velocidad del viento a una altura de 2 metros se puede utilizar la expresión utilizada en el estudio de Allen, et al. (2006).

$$u_2 = u \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \quad (G. 5)$$

Donde:

- $u_2$ : Velocidad del viento a 2 metros de altura [m/s]
- $u$ : Velocidad del viento registrada en centros meteorológicos [m/s]
- $z = 10$  [m] desde el nivel del suelo.

## **ANEXO H: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN EL INVERNADERO**

Para estimar el valor de la Evapotranspiración de referencia se utiliza la ecuación denominada FAO Penman-Monteith, la cual se muestra a continuación (Allen, et al., 2006).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta |In - Is| + A \gamma (t_i + 273)^{-1} u_2 (pvs_i - pva_i)}{\Delta + \gamma (1 + B u)} \quad (H. 1)$$

Donde:

- $ET_o$ : Evapotranspiración de referencia [ $\text{mm hr}^{-1}$ ]
- $\Delta$ : es la pendiente de la curva de presión de vapor en [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ].
- $In$ : Es la radiación neta sobre el invernadero [ $\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ].
- $Is$ : Es el calor transferido a través del suelo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ].
- $\gamma$ : Es la constante psicrométrica [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]
- $t_i$ : Es la temperatura del aire al interior del invernadero [ $^\circ\text{C}$ ]
- $u_2$ : Es la velocidad del viento a una altura de 2 metros en [ $\text{m s}^{-1}$ ].
- $pvs_i$ : Es la presión de vapor de saturación interior [ $\text{kPa}$ ]
- $pva_i$ : Es la presión de vapor interior [ $\text{kPa}$ ].
- A y B son constantes

Los valores A y B dependen de si la evapotranspiración ocurre de día o de noche. Para el día,  $A = 37$  y  $B = 0,24$  y para noche,  $A = 37$  y  $B = 0,96$  (Guevara, 2006).

También los valores de la irradiancia en el suelo ( $Is$ ) y la irradiancia neta ( $In$ ) en el invernadero cambian en según sea de día o de noche. Para el día,  $Is = 0,1 In$  y para la noche,  $Is = 0,2 In$  (Donatelli, et al., 2006).

El valor de  $In$  se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$In = 3,6 \frac{Rn}{Ss} \quad (H. 2)$$

Donde:

- In: Irradiancia neta [ $\text{MJ m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ ]
- Rn: Radiación neta [kW]
- Ss: Superficie del suelo del invernadero [ $\text{m}^2$ ]

La pendiente de la curva de presión de vapor ( $\Delta$ ) se puede obtener mediante la siguiente expresión (Donatelli, et al., 2006).

$$\Delta = 4098 \frac{0,6108 \exp \left[ 17,27 \frac{t_i}{t_i + 237,3} \right]}{(t_i + 237,3)^2} \quad (H. 3)$$

La velocidad del viento a una altura de 2 metros ( $u_2$ ), se calcula mediante la ecuación (G.5) del Anexo G.

La constante psicrométrica se puede obtener mediante la siguiente expresión (Donatelli, et al., 2006).

$$\gamma = C_{pa} \frac{P_{at}}{0,6219 \lambda_o} \quad (H. 4)$$

Donde:

- $C_{pa}$ : Calor específico del aire en [ $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ].
- $P_{at}$ : Presión atmosférica en [kPa]
- $\lambda_o$ : Calor latente de vaporización [ $\text{J kg}^{-1}$ ]

La presión atmosférica ( $P_{at}$ ) es función de la altura sobre el nivel del mar ( $z$ ) y se puede definir de la siguiente forma (Jensen, et al., 1990).

$$P_{at} = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26} \quad (H. 5)$$

El calor latente de vaporización ( $\lambda_o$ ) se puede obtener a partir de la siguiente expresión (Brooker, 1967).

$$\lambda_o = 2502535,259 - 2385,76424 t_i \quad (H. 6)$$

La presión de vapor del agua en aire interior se puede obtener de la siguiente forma (Allen, et al., 2006).

$$pva_i = HR_i pvs_i \quad (H. 7)$$

Donde:

- $HR_i$ : Humedad relativa al interior del invernadero [%]

La presión de vapor saturado se puede obtener mediante la siguiente expresión (Tetens, 1930).

$$pvs_i = 0,61078 \exp \left[ \frac{17,269 t_i}{(t_i + 237,3)} \right] \quad (H. 8)$$

**ANEXO I:** PARÁMETROS Y VARIABLES PARA DETERMINAR LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR VENTILACIÓN.

El caudal de aire en la ventilación natural de un invernadero se puede obtener mediante la siguiente expresión.

$$G = R \frac{V}{3600} \quad (I. 1)$$

Donde:

- G: Tasa de ventilación [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ]
- R: Tasa de ventilación [ $\text{h}^{-1}$ ]
- V: Volumen del invernadero [ $\text{m}^3$ ]

Cuando las ventanas están cerradas y no hay ventilación forzada, se puede considerar que la tasa de renovación de aire (R) para un invernadero nuevo con cubierta de plástico, debida a la infiltración de aire a través de la estructura, se puede considerar igual a 1 [ $\text{h}^{-1}$ ] (Valera, et al., 2008) y el volumen (V) es un parámetro del modelo.

Por otro lado, cuando las ventanas están abiertas parcial o totalmente, el caudal de aire (G) en [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] que pasa a través del invernadero generado debido al efecto combinado de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y el viento se puede calcular mediante la siguiente expresión (Kittas, et al., 1997).

$$G = Cd \sqrt{2g \frac{h_{12} |t_i - t_e|}{t_e (S_1^{-2} + S_2^{-2})} + 0,25 (S_1 + S_2)^2 C_v (u_2)^2} \quad (I. 2)$$

Donde:

- Cd: Coeficiente de caída de presión a través de una ventana
- g: Aceleración de gravedad igual a  $9,807[\text{m s}^{-2}]$
- $h_{12}$ : Distancia entre el centro de la ventana lateral y el centro de la ventana cenital

[m]

- $S_1$ : Superficie efectiva de ventilación lateral [m<sup>2</sup>]
- $S_2$ : Superficie efectiva de ventilación cenital en [m<sup>2</sup>]
- $C_v$ : Coeficiente del efecto del viento

De acuerdo con el estudio de Valera et al., (2008) se determina que el coeficiente del efecto del viento ( $C_v$ ) es igual a 0,1.

El coeficiente de caída de presión a través de una ventana con malla antiáfidos depende del coeficiente adimensional de pérdida de carga tal como se puede ver en el estudio de Valera et al., (2008).

$$Cd = \sqrt{F} \quad (I.3)$$

Donde

- $F$ : Coeficiente adimensional de pérdida de carga

El coeficiente de caída de presión ( $F$ ) puede estimarse mediante la siguiente expresión (Bailey, et al., 2003).

$$F = -0,0012 \left( \frac{L_v}{H_v} \right)^2 + 0,0396 \left( \frac{L_v}{H_v} \right) + 2,3047 + 1540 \alpha^{-1,65} + \exp(5,23 - 7,7 \varphi) \quad (I.4)$$

Donde:

- $L_v$ : Largo de la ventana [m]
- $H_v$ : Alto de la ventana [m]
- $\alpha$ : Ángulo de apertura [°]
- $\varphi$ : Porosidad de la malla [-]

El ángulo de apertura se obtiene de la siguiente forma:

$$\alpha = p_v \cdot 360^\circ \quad (I.5)$$

Donde:

- $p_v$ : Porcentaje de apertura de la ventana [%]
- $360^\circ$  representa la ventana totalmente abierta.
- La porosidad ( $\phi$ ) está definida en la sección 3.16.2 con un valor igual a 0,45.

El largo de la ventana ( $L_v$ ), el alto de la ventana ( $H_v$ ) y el porcentaje de apertura ( $p_v$ ) deben ser evaluados en la ecuación (I.4) por las dimensiones y el porcentaje de apertura de la ventana cenital o lateral, por lo cual se van a definir F1 y F2 como los coeficientes de caída de presión de la ventana lateral y cenital, respectivamente. Entonces la caída de presión total se va a definir de la siguiente forma.

$$F_T = \frac{F1 + F2}{2} \quad (I.6)$$

La superficie efectiva de ventilación lateral (S1) y la superficie efectiva de ventilación cenital (S2) se obtienen de la siguiente forma de acuerdo con la definición de éstas.

$$S1 = L_{vl} H_{vl} p_l \quad (I.7)$$

$$S2 = L_{vc} H_{vc} p_c \quad (I.8)$$

Donde:

- $L_{vl}$ ,  $H_{vl}$ ,  $L_{vc}$  y  $H_{vc}$  son el largo y el alto de la ventana lateral y cenital respectivamente.
- $p_l$  y  $p_c$  son los porcentajes de apertura de la ventana lateral y cenital respectivamente.

Para el caso en el que  $p_l \approx p_c \approx 0$ , el caudal de ventilación adopta el valor obtenido en la ecuación (I.1).

La densidad del aire se puede obtener mediante la siguiente expresión (Donatelli, et al., 2006).

$$\rho = \frac{1000 P_{in}}{1,01287 (t_i + 273,16)} \quad (I.9)$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del aire [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
- $P_{in}$ : Presión dentro del invernadero [kPa]
- $t_i$ : Temperatura del aire dentro del invernadero [ $^{\circ}\text{C}$ ]

La presión dentro del invernadero ( $P_{in}$ ) se puede considerar igual a la presión atmosférica (Valera, et al., 2008), la cual se puede calcular según la ecuación (H.5) del Anexo H.

La humedad absoluta de una masa de aire depende de la humedad relativa de acuerdo con la siguiente expresión (ASAE, 1999).

$$x = 0,6219 \frac{HR pvs}{(P_{at} - HR pvs)} \quad (I.10)$$

Donde

- HR: Humedad relativa [%]
- pvs: Presión de vapor saturado en el aire [kPa]

La presión de vapor saturado se puede obtener mediante la siguiente expresión

(Tetens, 1930).

$$pvs = 0,61078 \exp \left[ \frac{17,269 t}{(t + 237,3)} \right] \quad (I. 11)$$


Donde:

- t: Temperatura [°C]

**ANEXO J: INVERSIÓN EN CAPITAL FIJO**

ítem	Unidad	Cantidad	Valor [CLP]	Total
<b>Estructura</b>				<b>42.000.000</b>
Material	m^2	2.000	15.000	30.000.000
Instalación Estructura	m^2	2.000	6.000	12.000.000
<b>Cubierta</b>				<b>4.991.250</b>
Polietileno	m^2	3.438	1.100	3.781.250
Instalación	m^2	2.750	440	1.210.000
<b>Ventilación</b>				<b>12.013.239</b>
Automatización ventanas	gl	1	3.000.000	3.000.000
Ventiladores	un	5	1.677.870	8.389.350
Instalación Ventiladores	gl	1	335.574	335.574
Variador de frecuencia (0,75kW)	un	1	288.315	288.315
<b>Calefacción</b>				<b>103.209.120</b>
Caldera BM	un	1	46.457.600	46.457.600
Caldera Diésel	un	1	9.500.000	9.500.000
Instalación Calderas	gl	1	5.595.760	5.595.760
Bomba CP130	un	4	239.964	959.856
Bomba CP200	un	4	612.420	2.449.680
Válvula de bola 3 vías	un	138	138.913	19.169.994
PLC + Instalación	gl	1	6.500.000	6.500.000
Variador de frecuencia 2,2 kW	un	1	288.315	288.315
Variador de frecuencia 0,75 kW	un	1	288.315	288.315
Tubería principal	ml	100	10.556	1.055.600
Tubería zigzag	25 ml	228	48.000	10.944.000
<b>Riego</b>				<b>13.142.352</b>
Pozo	gl	1	10.000.000	10.000.000
Tanque	un	1	560.000	560.000
cintas	500 ml	3,04	155.530	472.811
Bomba SQF 5A-7	un	1	1.756.796	1.756.796
Variador de frecuencia	un	1	288.315	288.315
Tubería 25mm	6 ml	17	3.790	64.430
<b>Energía FV</b>				-
Paneles FV	un	0	80.000	-
Inversor	un	1	470.000	-
Instalación	wp	0	1.000	-
			Total	175.355.960

## ANEXO K: COSTOS OPERACIONALES DE REFERENCIA

Ficha técnico-económica						
Tomate Invernadero						
Región Valparaíso						
	Parámetros generales A					
	1 hectárea Julio 2014			Variedades: María Italia		
	Régimen hídrico: riego por goteo			Destino de producción: consumo fresco		
	Sistema de conducción: Entutorado			Tecnología: media		
Fecha de plantación: Junio-Julio			Fecha cosecha: Octubre-diciembre			
Parámetros generales B				Resumen contable:		
Rendimiento (Kg/ha):	154.000			Ingreso por hectárea (e)	43.120.000	
Precio de venta en predio (\$/Kg): (1)	280			Costos directos por hectárea (a+b+c)	24.992.580	
Costo jornada hombre (\$/JH)	13.000			Costos totales por hectárea (a+b+c+d)	26.242.209	
Tasa interés mensual (%)	1,50%			Margen bruto por hectárea (e - (a+b+c))	18.127.420	
Meses de financiamiento:	7			Margen neto por hectárea (e - (a+b+c+d))	16.877.791	
				Costo unitario (Kg)	\$ 170	
Costos directos						
	Época	Cantidad	Unidad	Precio(\$/Un)	Valor (\$)	
Mano de obra (a)						
Fertimiego	Junio-diciembre	18	JH	13.000	234.000	
Trasplante	Junio-julio	12	JH	13.000	156.000	
Acarreo de insumos	Junio-noviembre	4	JH	13.000	52.000	
Riego	Junio-diciembre	17	JH	13.000	221.000	
Poda	Junio-octubre	100	JH	13.000	1.300.000	
Amarra	Junio-noviembre	10	JH	13.000	130.000	
Aplicación fitosanitarios	Junio-diciembre	18	JH	13.000	234.000	
Confeccionar y terminar mesas	Junio-julio	10	JH	13.000	130.000	
Ventilar la nave y doble techo	Junio-noviembre	40	JH	13.000	520.000	
Limpiar el invernadero, reparar estructura	Junio-julio	30	JH	13.000	390.000	
Control manual de malezas	Junio-octubre	10	JH	13.000	130.000	
Poner la cinta (riego)	Junio	6	JH	13.000	78.000	
Desparramar guano	Junio	8	JH	13.000	104.000	
Aplicar hormona para cuajar los 2 primeros racimos	Agosto	15	JH	13.000	195.000	
Cosecha (2)	Octubre-diciembre	154.000	Kg	35	5.390.000	
<b>Total mano de obra</b>					<b>9.264.000</b>	
Maquinaria (b)						
Aradura	Junio	1,0	ha	60.000	60.000	
Rastrajes	Junio	3,0	ha	25.000	75.000	
Rotovator	Junio	1,0	ha	40.000	40.000	
Melgadura y hacer la mesa	Junio-julio	1,0	ha	40.000	40.000	
Acarreo de insumos	Junio-noviembre	1,0	ha	70.000	70.000	
Transporte de la cosecha al packing	Octubre-diciembre	1,0	ha	180.000	180.000	
Aplicación fitosanitarios (pistón)	Junio-diciembre	5,0	ha	25.000	125.000	
<b>Total maquinaria</b>					<b>590.000</b>	

ANEXO K: COSTOS OPERACIONALES DE REFERENCIA

Insumos (c) (3)					
Plántula de vivero (4)	Mayo-junio	28000,0	Unidad	110	3.080.000
<b>Fertilizantes:</b>					
Guano	Mayo	50,0	m3	5.500	275.000
Nitrato de potasio	Agosto-diciembre	800,0	kg	714	571.200
Nitrato de calcio	Junio-diciembre	450,0	Kg	357	160.850
Nitrato de amonio	Junio-diciembre	500,0	Kg	470	235.000
Acido fosfórico	Junio-diciembre	300,0	Kg	714	214.200
Ultrasol multipropósito	Junio-diciembre	250,0	Kg	782	190.500
<b>Fungicida:</b>					
Manzate	Junio-noviembre	2,0	Kg	4.100	8.200
Ridomil Gold MZ 88 WP	Julio-noviembre	2,0	Kg	20.470	40.940
Cercobin M	Agosto-octubre	1,0	Kg	21.500	21.500
Bellis	Agosto-octubre	1,0	Kg	113.549	113.549
Phyton (fungicida -bactericida)	Septiembre-octubre	1,0	L	37.218	37.218
<b>Insecticidas:</b>					
Applaud	Junio-noviembre	1,0	L	25.000	25.000
Zero 5 EC	Julio-diciembre	1,0	L	28.500	28.500
Neres 50% SP	Agosto-noviembre	2,0	Kg	28.070	56.140
Karate Zeon	Agosto-noviembre	1,0	L	35.500	35.500
Evisec 50 SP	Agosto-noviembre	3,0	200 gr	6.381	19.083
Actara 25 WG	Septiembre-diciembre	4,0	100gr	23.000	92.000
<b>Bactericida.</b>					
Strepto Plus	Agosto-septiembre	1,0	Kg	42.940	42.940
<b>Acaricida-insecticida:</b>					
Vertimec	Octubre-noviembre	1,0	L	20.087	20.087
Sunfire 240 SC	Octubre-noviembre	0,5	L	107.400	53.700
<b>Fumigante de suelo:</b>					
Basamid	Mayo	220,0	Kg	7.250	1.595.000

Continuación insumos (c) (3)					
<b>Otros</b>					
Fosfimax 40 - 20	Junio-diciembre	6,0	L	8.950	53.700
Terrasorb Foliar	Julio-noviembre	6,0	L	6.900	41.400
Rukan kuaja	Agosto-septiembre	2,0	L	34.500	69.000
Frutaliv	Julio-noviembre	3,0	L	7.900	23.700
Cinta garetá	Junio	40,0	Kg	3.800	152.000
Energía (luz)	Junio-diciembre	1600,0	Kwh	130	208.000
Cuota agua	Temporada	1,0	Cuota	50.000	50.000
Mulch	Junio	400,0	Kg	2.000	800.000
Poliétileno: doble techo	Junio-septiembre	400,0	Kg	1.800	640.000
Estructura de entutorado	Junio-octubre	1,0	ha	450.000	450.000
Polinización, desde el tercer al séptimo racimo (Abejorros)	Agosto-septiembre	8,0	ha	40.000	320.000
Malla para evitar que se escapen los abejorros	Septiembre-octubre	1,0	ha	100.000	100.000
Mantenimiento y reparación invernadero	Anual	1,0	ha	250.000	250.000
Análisis de suelo (fertilidad completa)	Abril	1,0	Análisis	25.000	25.000
Envases (caja, aproximado 18 kilos de tomate)	Septiembre-noviembre	8555,0	Caja	450	3.849.750
<b>Total insumos</b>					<b>13.948.457</b>
<b>Total costos directos (a+b+c)</b>					<b>23.802.457</b>
Imprevistos (5% sobre el total de los costos)			5%		1.190.123
<b>Costos indirectos (d)</b>					
Item	Época	Cantidad	Unidad	Precio(\$/un)	Valor (\$)
Costo financiero (tasa de interés) (5)	Mayo-Noviembre	1,5%	Porcentaje		1.249.629
Costo oportunidad (arriendo)					
Administración					
Impuestos y contribuciones					
<b>Total costos indirectos</b>					<b>1.249.629</b>
<b>Total costos</b>					<b>26.242.209</b>

**ANEXO L:** COSTOS OPERACIONALES DE BIOMASA Y DIÉSEL PARA CADA FBM.

Para FBM = 0,5

	Costo Biomasa [CLP]	Costo Diésel [CLP]
Noviembre	1.857.582	3.487.936
Diciembre	1.546.051	2.902.982
Enero	1.073.613	2.015.896
Febrero	2.104.959	3.952.430
Marzo	1.604.959	3.013.593
Mayo	3.232.753	6.070.062
Junio	4.208.080	7.901.409
Julio	4.324.345	8.119.717
Agosto	3.325.212	6.243.670
Septiembre	2.871.815	5.392.337
<b>Total Anual</b>	<b>26.149.369</b>	<b>49.100.033</b>

Para FBM = 0,6

	Costo Biomasa [CLP]	Costo Diésel [CLP]
Noviembre	2.229.098	2.790.349
Diciembre	1.855.261	2.322.385
Enero	1.288.335	1.612.717
Febrero	2.525.951	3.161.944
Marzo	1.925.951	2.410.875
Mayo	3.879.304	4.856.049
Junio	5.049.696	6.321.127
Julio	5.189.214	6.495.774
Agosto	3.990.255	4.994.936
Septiembre	3.446.178	4.313.870
<b>Total Anual</b>	<b>31.379.243</b>	<b>39.280.026</b>

Para FBM = 0,7

	Costo Biomasa [CLP]	Costo Diésel [CLP]
Noviembre	2.600.615	2.092.762
Diciembre	2.164.471	1.741.789
Enero	1.503.058	1.209.538
Febrero	2.946.943	2.371.458
Marzo	2.246.943	1.808.156
Mayo	4.525.854	3.642.037
Junio	5.891.312	4.740.846
Julio	6.054.083	4.871.830
Agosto	4.655.297	3.746.202
Septiembre	4.020.541	3.235.402
<b>Total Anual</b>	<b>36.609.116</b>	<b>29.460.020</b>

Para FBM = 0,8

	Costo Biomasa [CLP]	Costo Diésel [CLP]
Noviembre	2.972.131	1.395.175
Diciembre	2.473.681	1.161.193
Enero	1.717.780	806.358
Febrero	3.367.935	1.580.972
Marzo	2.567.935	1.205.437
Mayo	5.172.405	2.428.025
Junio	6.732.928	3.160.564
Julio	6.918.952	3.247.887
Agosto	5.320.339	2.497.468
Septiembre	4.594.904	2.156.935
<b>Total Anual</b>	<b>41.838.990</b>	<b>19.640.013</b>

**ANEXO M:** IRRADIANCIA DIRECTA NORMAL [W m<sup>-2</sup>]

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	0	0	0	0	0	0	0,0	692,9
Febrero	0	0	0	0	0	0	0,0	519,6
Marzo	0	0	0	0	0	0	0,0	89,5
Abril	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Mayo	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Junio	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Julio	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0,0	116,4
Octubre	0	0	0	0	0	0	0,0	429,1
Noviembre	0	0	0	0	0	0	251,2	651,1
Diciembre	0	0	0	0	0	0	352,1	721,0

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	867,0	968,9	1011,7	1035,3	1034,9	1024,2	1002,9	975,9
Febrero	771,7	903,4	977,7	1000,1	1014,0	1004,7	991,6	966,0
Marzo	694,6	828,2	876,4	925,0	923,8	930,6	919,5	892,1
Abril	516,4	663,5	725,7	767,9	696,0	793,0	780,6	772,7
Mayo	168,7	493,0	543,9	577,1	549,8	584,7	595,2	611,7
Junio	0,0	434,8	510,3	540,4	544,6	575,4	559,1	549,7
Julio	0,0	437,5	498,2	531,7	486,1	497,1	533,5	525,5
Agosto	276,3	473,9	530,1	571,7	433,4	482,0	540,2	588,0
Septiembre	490,4	610,6	640,2	648,8	445,1	628,1	629,0	634,0
Octubre	583,7	658,7	715,1	743,1	737,5	724,9	720,7	720,6
Noviembre	760,9	842,1	873,7	891,0	915,2	912,0	901,7	880,9
Diciembre	864,3	954,1	983,9	1015,1	1007,9	996,8	960,5	963,4

ANEXO M: IRRADIANCIA DIRECTA NORMAL [ $W m^{-2}$ ]

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	933,5	886,4	814,5	683,8	0	0	0	0
Febrero	944,6	879,8	782,6	478,6	0	0	0	0
Marzo	890,9	819,3	683,8	0,0	0	0	0	0
Abril	747,5	657,0	203,4	0,0	0	0	0	0
Mayo	554,6	567,4	0,0	0,0	0	0	0	0
Junio	521,4	489,0	0,0	0,0	0	0	0	0
Julio	498,3	573,0	0,0	0,0	0	0	0	0
Agosto	576,3	515,8	37,0	0,0	0	0	0	0
Septiembre	622,0	545,8	513,7	0,0	0	0	0	0
Octubre	698,8	628,2	677,9	0,0	0	0	0	0
Noviembre	851,1	779,6	696,4	5,6	0	0	0	0
Diciembre	953,3	904,1	814,2	642,8	0	0	0	0

**ANEXO N:** IRRADIANCIA DIFUSA HORIZONTAL [W m<sup>-2</sup>]

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	0	0	0	0	0	0	5,1	36,8
Febrero	0	0	0	0	0	0	0,0	26,4
Marzo	0	0	0	0	0	0	0,0	11,1
Abril	0	0	0	0	0	0	0,0	0,1
Mayo	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Junio	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Julio	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0,0	11,0
Octubre	0	0	0	0	0	0	1,5	37,0
Noviembre	0	0	0	0	0	0	16,3	47,3
Diciembre	0	0	0	0	0	0	18,8	46,1

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	52,9	61,9	74,4	81,5	91,7	102,1	104,2	97,6
Febrero	50,3	64,0	72,6	89,2	91,8	100,2	101,8	95,8
Marzo	41,1	59,3	78,7	89,1	104,5	105,1	104,4	95,5
Abril	32,2	58,2	81,9	102,3	151,5	114,7	109,0	88,0
Mayo	18,8	48,0	74,8	103,3	130,6	120,6	103,2	83,0
Junio	8,1	36,5	59,3	80,0	99,4	94,0	86,7	76,4
Julio	9,0	38,7	63,5	86,2	121,9	122,8	98,5	85,5
Agosto	23,3	55,4	84,5	116,1	190,7	173,1	129,3	100,2
Septiembre	46,3	78,1	122,7	160,2	301,1	196,3	175,2	132,1
Octubre	76,9	123,7	163,3	190,6	214,6	221,9	201,3	159,0
Noviembre	79,5	109,4	135,7	164,9	160,5	158,2	146,7	126,6
Diciembre	67,2	80,0	98,2	105,9	122,1	132,8	143,6	114,7

ANEXO N: IRRADIANCIA DIFUSA HORIZONTAL [ $W m^{-2}$ ]

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	91,7	74,3	51,5	29,8	0	0	0	0
Febrero	76,6	62,7	45,4	22,6	0	0	0	0
Marzo	67,2	53,4	33,2	2,7	0	0	0	0
Abril	64,2	42,7	13,3	0,0	0	0	0	0
Mayo	58,3	29,0	0,0	0,0	0	0	0	0
Junio	51,5	24,8	0,0	0,0	0	0	0	0
Julio	60,2	29,6	0,0	0,0	0	0	0	0
Agosto	71,0	42,2	9,2	0,0	0	0	0	0
Septiembre	93,0	59,2	22,9	0,0	0	0	0	0
Octubre	109,4	74,5	32,1	0,4	0	0	0	0
Noviembre	99,0	75,5	43,2	14,9	0	0	0	0
Diciembre	85,8	67,5	48,4	27,3	0	0	0	0

**ANEXO O:** TEMPERATURA EXTERIOR [°C]

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	15,6	14,4	13,5	12,9	12,6	11,6	12,1	13,8
Febrero	15,1	14,0	13,1	12,5	12,0	11,4	11,3	12,8
Marzo	14,7	13,7	12,8	12,0	11,3	10,8	10,0	10,6
Abril	11,4	10,4	9,5	8,7	7,9	7,4	6,8	6,9
Mayo	8,2	7,3	6,5	5,7	5,1	4,9	4,1	3,5
Junio	6,6	5,8	5,2	4,6	4,0	3,5	3,0	2,2
Julio	5,8	5,1	4,4	3,8	3,2	2,7	2,3	1,5
Agosto	7,4	6,7	6,1	5,4	4,9	4,5	4,0	3,4
Septiembre	9,4	8,7	8,0	7,5	6,8	6,1	5,3	5,5
Octubre	10,9	10,0	9,2	8,6	7,9	7,3	6,6	7,5
Noviembre	12,8	11,8	11,0	10,4	9,7	8,8	8,9	10,1
Diciembre	14,9	13,8	13,0	12,2	11,6	10,4	11,0	12,6

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	17,1	20,8	24,7	27,8	30,1	31,6	32,6	32,5
Febrero	15,5	19,7	23,6	26,9	29,4	31,3	32,5	32,7
Marzo	13,4	17,6	21,7	25,3	28,1	30,3	31,7	31,6
Abril	8,7	12,6	17,0	20,7	23,7	26,0	27,4	27,7
Mayo	4,3	7,2	11,9	16,0	19,4	21,7	23,3	23,8
Junio	2,9	4,7	8,1	11,6	14,7	16,9	18,4	18,8
Julio	2,2	4,4	8,0	11,7	14,9	17,3	18,8	19,2
Agosto	4,4	7,0	10,5	13,9	17,1	19,5	20,9	21,3
Septiembre	7,0	10,3	13,8	16,9	19,3	21,0	22,3	22,7
Octubre	10,2	14,0	18,0	21,3	24,0	25,8	26,9	27,1
Noviembre	13,7	17,3	21,2	24,3	26,9	28,6	29,7	29,6
Diciembre	15,8	19,8	23,9	27,1	29,5	31,2	32,2	32,2

ANEXO O: TEMPERATURA EXTERIOR [°C]

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	31,7	30,5	28,4	25,2	21,9	19,8	18,2	16,9
Febrero	31,7	30,4	27,8	24,0	21,1	19,2	17,6	16,3
Marzo	30,6	28,8	25,8	22,4	20,1	18,5	17,0	15,7
Abril	26,5	24,4	20,8	18,3	16,3	14,9	13,5	12,3
Mayo	22,7	20,0	16,9	14,8	13,0	11,4	10,0	9,1
Junio	18,3	15,8	13,5	11,7	10,5	9,3	8,2	7,3
Julio	18,8	16,3	13,6	11,7	10,2	8,8	7,6	6,6
Agosto	20,5	19,0	15,9	13,6	11,7	10,4	9,3	8,3
Septiembre	22,2	20,9	18,4	15,8	14,0	12,6	11,4	10,3
Octubre	26,3	24,8	22,5	19,1	16,5	14,7	13,3	12,0
Noviembre	28,7	27,2	25,3	22,1	19,0	16,9	15,3	14,0
Diciembre	31,3	30,0	27,9	24,7	21,2	18,9	17,4	16,2

**ANEXO P:** VELOCIDAD DEL VIENTO A 2 METROS DE ALTURA [m s<sup>-1</sup>]

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	0,51	0,59	0,62	0,69	0,70	0,79	0,74	0,69
Febrero	0,52	0,51	0,53	0,56	0,58	0,62	0,66	0,63
Marzo	0,63	0,70	0,74	0,81	0,84	0,89	0,95	0,90
Abril	0,85	0,92	0,93	0,97	0,98	1,03	1,06	1,02
Mayo	1,09	1,08	1,05	1,07	1,03	1,07	1,11	1,14
Junio	1,05	1,08	1,14	1,20	1,25	1,24	1,23	1,23
Julio	1,05	1,10	1,14	1,18	1,23	1,23	1,22	1,24
Agosto	1,12	1,18	1,18	1,19	1,18	1,18	1,13	1,20
Septiembre	0,98	0,99	1,03	1,04	1,06	1,11	1,17	1,13
Octubre	0,70	0,71	0,75	0,78	0,83	0,91	1,00	0,88
Noviembre	0,57	0,58	0,68	0,73	0,84	0,94	0,98	0,83
Diciembre	0,55	0,53	0,59	0,65	0,73	0,82	0,80	0,73

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	0,61	0,53	0,66	1,09	1,58	1,98	2,33	2,53
Febrero	0,55	0,50	0,69	1,15	1,63	1,94	2,33	2,52
Marzo	0,70	0,44	0,45	0,77	1,29	1,68	1,95	2,06
Abril	0,92	0,63	0,45	0,50	0,87	1,28	1,54	1,70
Mayo	1,10	0,98	0,74	0,60	0,56	0,70	0,92	1,07
Junio	1,22	1,18	0,93	0,80	0,65	0,50	0,58	0,72
Julio	1,27	1,20	0,92	0,83	0,70	0,58	0,62	0,76
Agosto	1,27	1,06	0,88	0,90	0,78	0,61	0,60	0,67
Septiembre	1,05	0,87	0,75	0,62	0,65	0,81	1,06	1,22
Octubre	0,77	0,64	0,60	0,63	0,98	1,37	1,71	1,93
Noviembre	0,74	0,64	0,58	0,66	1,07	1,50	1,93	2,20
Diciembre	0,67	0,52	0,55	0,90	1,39	1,80	2,10	2,44

ANEXO P: VELOCIDAD DEL VIENTO A 2 METROS DE ALTURA [ $m s^{-1}$ ]

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	2,46	1,93	1,17	0,75	1,00	1,16	0,96	0,63
Febrero	2,38	1,81	1,03	0,70	1,04	1,33	1,11	0,68
Marzo	1,87	1,43	0,82	0,91	0,99	0,76	0,61	0,53
Abril	1,54	1,17	0,88	0,97	0,88	0,71	0,71	0,74
Mayo	1,04	0,73	0,68	0,71	0,68	0,76	0,82	0,98
Junio	0,79	0,67	0,69	0,69	0,74	0,89	0,93	1,00
Julio	0,78	0,68	0,70	0,74	0,78	0,93	0,99	1,01
Agosto	0,66	0,57	0,70	0,80	0,90	1,05	1,11	1,15
Septiembre	1,28	1,13	0,88	0,94	0,92	0,83	0,85	0,88
Octubre	2,02	1,78	1,33	1,19	1,16	0,92	0,71	0,64
Noviembre	2,36	2,14	1,63	1,29	1,39	1,22	0,83	0,58
Diciembre	2,48	2,12	1,62	1,12	1,32	1,47	1,25	0,71

**ANEXO Q: FACTOR DE NUBOSIDAD**

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	0	0	0	0	0	0	0,06948	0,11414
Febrero	0	0	0	0	0	0	0	0,16848
Marzo	0	0	0	0	0	0	0	0,17122
Abril	0	0	0	0	0	0	0	0,01538
Mayo	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	0	0	0	0,36923
Octubre	0	0	0	0	0	0	0,12407	0,43672
Noviembre	0	0	0	0	0	0	0,24872	0,25128
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0,1809	0,17085

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	0,08933	0,05707	0,05459	0,05459	0,06452	0,07692	0,08933	0,09926
Febrero	0,1413	0,09511	0,06793	0,07337	0,07065	0,08152	0,08696	0,09511
Marzo	0,16377	0,14144	0,1464	0,12655	0,13896	0,134	0,13648	0,14392
Abril	0,29231	0,27692	0,26923	0,25385	0,3359	0,24103	0,24359	0,22821
Mayo	0,37469	0,41687	0,42432	0,41687	0,45409	0,41935	0,3995	0,35732
Junio	0,39487	0,44615	0,43846	0,43846	0,44615	0,41538	0,42308	0,40769
Julio	0,39206	0,44913	0,45658	0,45161	0,51117	0,50124	0,45658	0,44417
Agosto	0,41439	0,46402	0,45409	0,43424	0,58065	0,5335	0,46898	0,40199
Septiembre	0,42308	0,37179	0,37692	0,38718	0,59231	0,41282	0,40256	0,37949
Octubre	0,38462	0,35732	0,33002	0,3201	0,33251	0,34243	0,33499	0,31514
Noviembre	0,2359	0,20256	0,2	0,20256	0,18462	0,18462	0,18205	0,18205
Diciembre	0,13065	0,09548	0,09799	0,08794	0,10302	0,11307	0,13819	0,11558

ANEXO Q: FACTOR DE NUBOSIDAD

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	0,11414	0,11663	0,10422	0	0	0	0	0
Febrero	0,08696	0,10054	0,09511	0	0	0	0	0
Marzo	0,10918	0,11166	0,06452	0	0	0	0	0
Abril	0,20769	0,19487	0,07179	0	0	0	0	0
Mayo	0,36476	0,14888	0	0	0	0	0	0
Junio	0,37949	0,18718	0	0	0	0	0	0
Julio	0,4268	0,14888	0,00744	0	0	0	0	0
Agosto	0,37469	0,34491	0,14888	0	0	0	0	0
Septiembre	0,35897	0,37179	0,1	0	0	0	0	0
Octubre	0,30521	0,3201	0,06203	0	0	0	0	0
Noviembre	0,17949	0,19744	0,16667	0	0	0	0	0
Diciembre	0,09548	0,09548	0,09296	0	0	0	0	0

**ANEXO R: HUMEDAD RELATIVA EXTERIOR**

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	67,3%	67,8%	68,1%	68,4%	69,2%	69,2%	68,9%	56,2%
Febrero	70,2%	70,5%	70,2%	71,8%	73,1%	73,9%	76,8%	71,5%
Marzo	73,1%	72,8%	72,8%	72,8%	73,1%	73,1%	73,6%	70,7%
Abril								
Mayo	72,1%	73,0%	73,9%	75,1%	76,2%	75,6%	75,3%	74,8%
Junio	78,6%	78,1%	76,6%	79,1%	82,8%	84,6%	83,3%	82,6%
Julio	73,9%	72,8%	73,9%	76,9%	78,5%	77,4%	77,4%	76,9%
Agosto	75,1%	77,0%	76,1%	76,8%	75,7%	75,9%	74,6%	76,6%
Septiembre	73,0%	73,0%	73,2%	73,2%	72,3%	73,4%	73,4%	71,5%
Octubre								
Noviembre	62,1%	63,6%	63,8%	66,2%	69,2%	69,7%	68,2%	60,6%
Diciembre	64,0%	65,5%	66,9%	68,3%	68,9%	69,5%	68,0%	53,2%

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	48,5%	42,7%	37,9%	34,4%	32,3%	29,9%	28,4%	27,6%
Febrero	61,0%	52,0%	44,1%	38,3%	34,6%	31,4%	30,1%	29,0%
Marzo	56,8%	48,7%	43,4%	38,6%	35,1%	33,5%	32,9%	33,5%
Abril								
Mayo	72,4%	57,1%	48,1%	43,7%	39,8%	38,3%	38,6%	40,4%
Junio	81,6%	76,6%	69,5%	66,0%	62,7%	60,5%	58,0%	57,7%
Julio	75,8%	69,8%	58,7%	55,2%	51,6%	49,5%	48,4%	48,9%
Agosto	74,0%	68,6%	63,1%	59,2%	55,5%	51,9%	48,3%	47,2%
Septiembre	65,1%	59,5%	54,9%	49,9%	47,3%	46,0%	44,2%	44,7%
Octubre								
Noviembre	56,0%	51,3%	47,2%	43,5%	39,0%	34,6%	30,7%	28,8%
Diciembre	46,0%	39,4%	34,0%	28,9%	25,2%	22,9%	22,0%	22,3%

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	28,6%	31,8%	36,8%	44,8%	57,5%	66,0%	70,0%	71,8%
Febrero	29,8%	32,5%	37,5%	44,6%	53,6%	57,3%	60,2%	61,5%
Marzo	35,3%	38,6%	44,4%	56,2%	64,5%	69,6%	72,8%	74,2%
Abril								
Mayo	44,6%	52,9%	67,9%	75,9%	80,7%	81,0%	80,4%	78,9%
Junio	59,2%	62,0%	65,0%	66,3%	67,0%	66,5%	66,5%	65,5%
Julio	51,4%	60,6%	72,8%	78,8%	84,0%	87,0%	88,3%	90,2%
Agosto	48,5%	54,5%	66,9%	73,8%	77,4%	79,4%	81,1%	82,8%
Septiembre	46,2%	50,6%	59,3%	68,0%	75,2%	79,3%	81,9%	90,2%
Octubre								
Noviembre	29,2%	31,6%	36,6%	46,1%	55,6%	59,9%	61,5%	62,1%
Diciembre	24,3%	28,3%	33,7%	41,2%	56,0%	65,2%	70,0%	72,6%

**ANEXO S:** POTENCIA DE CALEFACCIÓN Y ENFRIAMIENTO PARA CADA HORA DEL MES [KW]

La potencia de calefacción se presenta en las celdas de color rojo con valores positivos y la potencia de enfriamiento se presenta en las celdas de color azul con valores negativos

	0	1	2	3	4	5	6	7
Enero	0,00	57,92	130,818	161,031	161,965	177,377	233,252	0,00
Febrero	165,95	172,93	179,32	184,97	190,69	199,071	215,626	54,67
Marzo	139,80	153,02	162,50	170,10	176,36	180,675	187,849	208,56
Abril								
Mayo	206,42	215,39	223,75	233,00	238,85	241,684	250,606	257,619
Junio	227,10	235,18	241,97	248,28	255,12	261,134	266,503	275,562
Julio	235,45	243,59	250,73	257,41	264,43	270,221	275,533	284,920
Agosto	214,27	221,46	228,37	235,16	241,22	245,948	251,672	258,407
Septiembre	197,109	204,12	210,86	216,65	223,74	230,933	239,630	214,49
Octubre								
Noviembre	151,87	153,21	161,21	167,08	172,93	182,135	124,97	0,00
Diciembre	58,96	133,74	164,398	169,32	173,81	184,108	92,20	0,00

	8	9	10	11	12	13	14	15
Enero	0,00	0,00	-650,29	-424,743	-383,179	-334,411	-324,014	-231,559
Febrero	0,00	0,00	-416,01	-477,28	-388,346	-367,532	-402,174	-317,024
Marzo	0,00	0,00	0,00	-509,95	-306,993	-349,539	-423,102	-390,732
Abril								
Mayo	44,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-16,620
Junio	266,076	311,253	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Julio	274,397	313,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agosto	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Septiembre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Octubre								
Noviembre	0,00	0,00	-8,69	-634,198	-518,664	-373,328	-239,554	-113,131
Diciembre	0,00	0,00	-436,89	-377,237	-174,914	-57,040	-32,063	0,000

ANEXO S: POTENCIA DE CALEFACCIÓN Y ENFRIAMIENTO PARA CADA HORA DEL MES [KW]

	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	-178,702	-189,214	-176,605	-127,998	0,000	0,000	0,000	0,000
Febrero	-246,562	-205,097	-157,611	0,000	82,700	105,390	122,239	134,866
Marzo	-340,719	-260,755	-199,912	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Abril								
Mayo	0,00	0,00	108,618	127,982	141,669	146,527	165,924	174,964
Junio	0,00	0,00	143,062	155,322	165,917	177,287	188,129	197,372
Julio	0,00	0,00	141,884	155,140	168,303	181,958	193,879	203,953
Agosto	0,00	0,00	156,297	137,055	150,208	162,026	172,313	182,366
Septiembre	0,00	0,00	0,00	121,850	137,635	147,257	156,897	166,072
Octubre								
Noviembre	-8,430	0,000	-48,663	0,000	58,603	82,951	100,966	114,996
Diciembre	0,000	-33,609	-30,613	0,000	57,590	81,384	99,092	113,658

**ANEXO T:** POTENCIA TOTAL ENTREGADA POR LOS VENTILADORES OPERATIVOS

Tabla T.1 Potencia total entregada por los ventiladores operativos [KW]

	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
<b>Noviembre</b>	0,96	1,00	1,80	2,14	1,94	1,59	1,14		0,60	
<b>Diciembre</b>	1,05	0,85	1,20	1,42	1,72	2,02	1,90	1,51	0,68	
<b>Enero</b>	0,72	1,72	1,92	2,54	2,01	2,58	2,19	1,60	1,26	0,38
<b>Febrero</b>	0,69	1,62	1,75	2,68	2,68	2,08	2,47	1,50	0,86	
<b>Marzo</b>		1,68	1,39	1,90	2,44	2,27	2,45	2,23	1,45	
<b>Abril</b>										
<b>Mayo</b>						2,14				

Tabla T.2 Cantidad de ventiladores operativos en cada hora de cada mes con ventilación forzada

	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
Noviembre	2	3	3	3	3	3	3	0	2	
Diciembre	2	3	3	3	3	3	3	3	3	
Enero	3	3	4	4	5	4	4	4	3	2
Febrero	3	3	4	4	5	5	4	4	3	
Marzo		3	3	4	5	5	4	3	2	
Abril										
Mayo						5				

Tabla T.3 Características del Ventilador Axial

<b>Ventilador</b>	
Marca	Campagnoni
Modelo	AIRTEC 1215
Potencia Nominal Ventilador [kW]	0,75
Caudal Nominal [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	14,30
Voltaje nominal [V]	380

**ANEXO U:** FLUJO DE CAJA Y TABLA DE AMORTIZACIÓN (75% DE FINANCIAMIENTO Y FBM=0,8)

El flujo de caja es el siguiente:

Período	0	1	2	3	4	5
Ingreso		167.057.649	167.260.852	167.464.056	167.667.259	167.870.462
Costo Operacional		\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742
Utilidad Operacional		\$60.580.907	\$60.784.111	\$60.987.314	\$61.190.517	\$61.393.721
Interés Crédito LP		\$-10.064.722	\$-7.767.423	\$-5.329.989	\$-2.743.871	
Depreciación		\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898
Pérdidas del periodo anterior		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Base Imponible		\$36.549.287	\$39.049.789	\$41.690.427	\$44.479.748	\$47.426.822
Impuesto (27%)		\$-9.868.307	\$-10.543.443	\$-11.256.415	\$-12.009.532	\$-12.805.242
Utilidad Neta		\$26.680.979	\$28.506.346	\$30.434.012	\$32.470.216	\$34.621.580
Depreciación		\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898
Pérdidas del periodo anterior		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Inversión Capital Fijo	\$-176.090.760			\$-4.991.250		
Valor Libro						
Capital de Trabajo	\$-43.903.168					
Recuperación Capital de Trabajo						
Crédito	\$164.995.446					
Amortización Crédito LP		\$-37.660.641	\$-39.957.940	\$-42.395.374	\$-44.981.492	
Flujo de Caja	\$-54.998.482	\$2.987.237	\$2.515.305	\$2.005.536	\$1.455.623	\$48.588.479
Flujo de Caja Actualizado	\$-54.998.482	\$2.667.176	\$2.005.186	\$1.427.501	\$925.074	\$27.570.408
Flujo de Caja Acumulado	\$-54.998.482	\$-52.331.306	\$-50.326.120	\$-48.898.620	\$-47.973.545	\$-20.403.137

ANEXO U: FLUJO DE CAJA Y TABLA DE AMORTIZACIÓN (75% DE FINANCIAMIENTO Y FBM=0,8)

Período	6	7	8	9	10
Ingreso	168.073.665	168.276.869	168.480.072	168.683.275	168.886.479
Costo Operacional	\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742	\$-106.476.742
Utilidad Operacional	\$61.596.924	\$61.800.127	\$62.003.330	\$62.206.534	\$62.409.737
Interés Crédito LP					
Depreciación	\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898	\$-13.966.898
Pérdidas del periodo anterior	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Base Imponible	\$47.630.026	\$47.833.229	\$48.036.432	\$48.239.635	\$48.442.839
Impuesto (27%)	\$-12.860.107	\$-12.914.972	\$-12.969.837	\$-13.024.702	\$-13.079.566
Utilidad Neta	\$34.769.919	\$34.918.257	\$35.066.595	\$35.214.934	\$35.363.272
Depreciación	\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898	\$13.966.898
Pérdidas del periodo anterior	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Inversión Capital Fijo	\$-4.991.250			\$-4.991.250	
Valor Libro					61.896.997
Capital de Trabajo					
Recuperación Capital de Trabajo					\$43.903.168
Crédito					
Amortización Crédito LP					
Flujo de Caja	\$48.736.817	\$48.885.155	\$49.033.494	\$49.181.832	\$155.130.336
Flujo de Caja Actualizado	\$24.691.588	\$22.113.162	\$19.803.806	\$17.735.462	\$49.947.816
Flujo de Caja Acumulado	\$4.288.451	\$26.401.612	\$46.205.418	\$63.940.880	\$113.888.696

La tabla de amortización es la siguiente:

i	6,10%				
% crédito	75%				
Periodo	0	1	2	3	4
Crédito	\$164.914.054	\$127.271.992	\$87.333.763	\$44.959.303	-
Cuota		\$47.701.820	\$47.701.820	\$47.701.820	\$47.701.820
Interés		\$10.059.757	\$7.763.591	\$5.327.360	\$2.742.517
Amortización		\$37.642.063	\$39.938.229	\$42.374.460	\$44.959.303

**ANEXO V:** RESULTADOS SIMULACIÓN DE MONTECARLO PARA 5.000 ITERACIONES

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>	<i>IVAN</i>
\$66.347.781	1	0,02%	30,16%
\$67.871.370	1	0,04%	30,85%
\$69.394.959	0	0,04%	31,54%
\$70.918.548	0	0,04%	32,24%
\$72.442.137	0	0,04%	32,93%
\$73.965.726	2	0,08%	33,62%
\$75.489.315	1	0,10%	34,31%
\$77.012.904	3	0,16%	35,01%
\$78.536.493	3	0,22%	35,70%
\$80.060.082	2	0,26%	36,39%
\$81.583.671	8	0,42%	37,08%
\$83.107.260	8	0,58%	37,78%
\$84.630.849	10	0,78%	38,47%
\$86.154.438	20	1,18%	39,16%
\$87.678.027	24	1,66%	39,85%
\$89.201.616	28	2,22%	40,55%
\$90.725.205	37	2,96%	41,24%
\$92.248.794	34	3,64%	41,93%
\$93.772.383	39	4,42%	42,62%
\$95.295.972	44	5,30%	43,32%
\$96.819.561	79	6,88%	44,01%
\$98.343.150	77	8,42%	44,70%
\$99.866.739	107	10,56%	45,40%
\$101.390.328	131	13,18%	46,09%
\$102.913.917	128	15,74%	46,78%
\$104.437.505	134	18,42%	47,47%
\$105.961.094	164	21,70%	48,17%
\$107.484.683	158	24,86%	48,86%
<b>\$109.008.272</b>	<b>200</b>	<b>28,86%</b>	<b>49,55%</b>
\$110.531.861	201	32,88%	50,24%
\$112.055.450	224	37,36%	50,94%
\$113.579.039	250	42,36%	51,63%
\$115.102.628	238	47,12%	52,32%
\$116.626.217	223	51,58%	53,01%
\$118.149.806	224	56,06%	53,71%

\$119.673.395	228	60,62%	54,40%
\$121.196.984	218	64,98%	55,09%
\$122.720.573	202	69,02%	55,78%
\$124.244.162	176	72,54%	56,48%
\$125.767.751	168	75,90%	57,17%
\$127.291.340	172	79,34%	57,86%
\$128.814.929	158	82,50%	58,55%
\$130.338.518	129	85,08%	59,25%
\$131.862.107	137	87,82%	59,94%
\$133.385.696	98	89,78%	60,63%
\$134.909.285	98	91,74%	61,32%
\$136.432.874	71	93,16%	62,02%
\$137.956.463	60	94,36%	62,71%
\$139.480.052	55	95,46%	63,40%
\$141.003.641	45	96,36%	64,09%
\$142.527.230	44	97,24%	64,79%
\$144.050.819	34	97,92%	65,48%
\$145.574.408	27	98,46%	66,17%
\$147.097.997	23	98,92%	66,86%
\$148.621.586	14	99,20%	67,56%
\$150.145.175	12	99,44%	68,25%
\$151.668.764	8	99,60%	68,94%
\$153.192.353	3	99,66%	69,63%
\$154.715.942	5	99,76%	70,33%
\$156.239.531	6	99,88%	71,02%
\$157.763.120	1	99,90%	71,71%
\$159.286.709	2	99,94%	72,41%
\$160.810.298	0	99,94%	73,10%
\$162.333.887	2	99,98%	73,79%
\$163.857.476	0	99,98%	74,48%
\$165.381.065	0	99,98%	75,18%
\$166.904.654	0	99,98%	75,87%
\$168.428.243	0	99,98%	76,56%
\$169.951.832	0	99,98%	77,25%
\$171.475.421	0	99,98%	77,95%
y mayor...	1	100,00%	
	5000		