

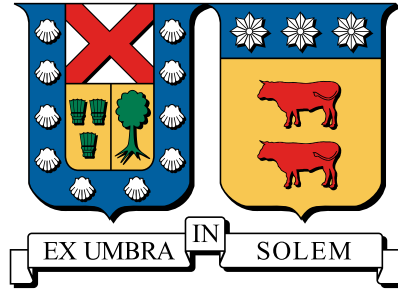
2020-12

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL A MICRO ESCALA DEL FLUJO DE HELADAS SOBRE CULTIVOS DE CEREZO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

BOLADOS ARROYO, CONSUELO VICTORIA

<https://hdl.handle.net/11673/49887>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE

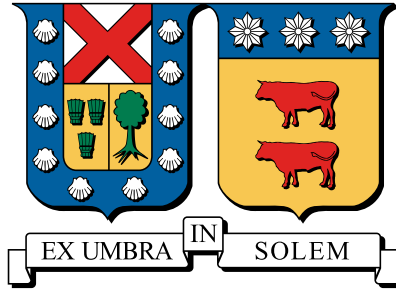
SIMULACIÓN COMPUTACIONAL A MICRO ESCALA DEL FLUJO DE HELADAS SOBRE CULTIVOS DE CEREZO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Consuelo Victoria Bolados Arroyo

Ingeniera Civil Mecánica

Profesor Guía: Dr. Ing. Alex Flores

Diciembre 2020



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

**SIMULACIÓN COMPUTACIONAL A MICRO ESCALA DEL FLUJO DE
HELADAS SOBRE CULTIVOS DE CEREZO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE**

CONSUELO VICTORIA BOLADOS ARROYO

Tesis de grado para optar al grado de:

Ingeniera Civil Mecánica

y al título de:

Ingeniera Civil Mecánica

Profesor Guía: Dr. Ing. Alex Flores

Profesor Correferente: Mg. Ing Jaime Espinoza

Diciembre 2020

TITULO DE LA TESIS:

**SIMULACIÓN COMPUTACIONAL A MICRO ESCALA DEL FLUJO DE HELADAS
SOBRE CULTIVOS DE CEREZO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE**

AUTOR:

Consuelo Victoria Bolados Arroyo

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de
Ingeniera Civil Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Dr. Ing. Alex Flores

Mg. Ing Jaime Espinoza

VALPARAÍSO CHILE - 2020

Quien nunca se equivocó, nunca hizo nada.

Baden Powell

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me ayudaron directa o indirectamente en este proceso de tesis, creyendo en mí y levantándose cuando creí que no era posible. Podrán ver en este trabajo pequeñas partes de todos ustedes, a través de fórmulas y términos que probablemente no se entiendan.

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre, Elizabeth, por fomentarme desde pequeña la curiosidad y responderme todos los por qué que se me ocurrieran. A mis hermanas, Javiera, Rocío, Paloma y Camila, por ser excelentes hermanas mayores, cuidarme y enseñarme con inolvidables aventuras. Y a ti, Pascual, por ser mi pilar más sólido en estos seis años.

Con especial cariño, quiero agradecer a mis amigos, Patricio, Sergio, Sebastián y Elías(s) por no sólo acompañarme durante largas jornadas de estudio. También, por hacer de la universidad una experiencia inolvidable, y por cuestionarme constantemente, para así irnos de la universidad como mejores personas.

Finalmente, agradecer a mis profesores, por la paciencia y por permitirme recibir el conjunto de conocimientos que sustentan esta tesis. En especial, a Alex Flores, por acompañarme durante este largo proceso y nunca dejar de confiar en mí.

Resumen

Actualmente, los cultivos de Viveros de Copequen sufren daños por heladas radiativas recurrentemente, a pesar de contar con máquinas de viento. Esto, motivó a la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF) a solicitar apoyo técnico para dar una solución integral a este problema.

Se propone realizar una simulación a micro escala, que reproduzca el fenómeno de la helada, donde el flujo de viento se encuentra estratificado en una atmósfera estáticamente estable. Para esto, fue necesario construir perfiles de velocidad y temperatura en base a relaciones semiempíricas establecidas en estudios anteriores. Éstos, fueron ajustados para cada simulación según las propiedades y estabilidad térmica de tres días fríos característicos y un día de helada radiativa.

Para esto, se realizó una simulación RANS SST en Ansys Fluent, en un dominio micro escala anidado dentro de otro meso escala, además de estudiar y parametrizar los cultivos de cerezas Santina y Skeena. La simulación se realiza en estado estacionario, pues se considera que el fenómeno físico se encuentra ya desarrollado, y que el aire se comporta como un fluido newtoniano incompresible. Debido a los bajos gradientes de presión y temperatura en los primeros 50 [m] de altura, donde se lleva a cabo la simulación.

Es posible comprobar que la simulación logra replicar el comportamiento dinámico y térmico adecuadamente, según la caracterización del fenómeno físico de heladas radiativas. Además, se recomienda encender las máquinas de viento cuando el gradiente térmico sea mayor a $4[^\circ\text{C}]$ y apuntar éstas mayormente a los centros de los cultivos, pues son en promedio $2,8[^\circ\text{C}]$ menores que en el frente de ataque.

En el futuro, resulta interesante simular la interacción de las máquinas de viento con el cultivo, para poder evidenciar su efecto al combatir los daños en los frutos producto de la helada al comparar los resultados con los presentados en esta investigación.

Abstract

Currently, the crops of Viveros de Copequen suffer recurrent damage from radiative frost, despite having wind machines. This motivated the Foundation for Fruit Development (FDF) to request technical support to provide a comprehensive solution to this problem.

It is proposed to carry out a micro-scale simulation that reproduces the phenomenon of frost, where the wind flow is stratified in a statically stable atmosphere. For this, it was necessary to build speed and temperature profiles based on semi-empirical relations established in previous studies. These were adjusted for each simulation according to the properties and thermal stability of three characteristic cold days and one day of radiative frost.

For this, a RANS SST simulation was performed in Ansys Fluent, in a micro-scale domain nested within another mesoscale, in addition to studying and parameterizing the Santana and Skeena cherry crops. The simulation is carried out in a steady state, since it is considered that the physical phenomenon is already developed, and that the air behaves like an incompressible Newtonian fluid. Due to the low pressure and temperature gradients on the first 50 [m] altitude, where the simulation is carried out.

It is possible to verify that the simulation manages to replicate the dynamic and thermal behavior adequately, according to the characterization of the physical phenomenon of radiative frosts. In addition, it is recommended to turn on the wind machines when the thermal gradient is greater than $4[^\circ\text{C}]$ and point them mainly to the centers of the crops, since they are on average $2,8[^\circ\text{C}]$ colder than in the attack front.

In the future, it is interesting to simulate the interaction of wind machines with the crop, in order to demonstrate their effect in combating damage to fruits caused by frost when comparing the results with those presented in this research.

Índice general

Agradecimientos	7
Resumen	9
Abstract	11
Nomenclatura	20
1. Introducción	23
1.1. Objetivos	24
1.1.1. Objetivos Generales	24
1.1.2. Objetivos Específicos	24
1.2. Estructura del Documento	24
2. Planteamiento del problema	26
2.1. Enfoque de la investigación	26
2.2. Contexto	27
2.2.1. Cambio Climático	29
2.3. Descripción y Caracterización	30
2.3.1. Descripción Geográfica	31
2.3.2. Factores Meteorológicos	32
2.4. Equipos utilizados	34
2.4.1. Equipos en Viveros de Copequen	37
2.5. Efectos y síntomas	38
2.5.1. Efectos productivos	39
2.5.2. Impacto económico	40
3. Estado del Arte	42
3.1. Control de heladas	43

3.1.1.	Ventilación forzada horizontal	45
3.1.2.	Ventilación Vertical	46
3.1.3.	Ventilación vertical aérea	48
3.1.4.	Calefacción	49
3.2.	Operación y control	49
3.2.1.	Parámetros operacionales y de funcionamiento	49
3.2.2.	Control	51
3.3.	Modelación numérica	52
3.3.1.	Estudio LES de flujos térmicamente estratificados sobre cultivos	53
3.3.2.	Rugosidad aerodinámica de cultivos	54
4.	Marco Teórico	56
4.1.	El Cerezo	56
4.1.1.	Morfología	56
4.1.2.	Especies	60
4.2.	La helada como fenómeno atmosférico	61
4.2.1.	Clasificación de las heladas	62
4.2.2.	Factores relevantes en la intensidad de una helada	63
4.3.	Caracterización Termodinámica de la Atmósfera	64
4.3.1.	Balance energético	70
4.3.2.	Turbulencia	73
4.4.	Ecuaciones gobernantes	74
4.4.1.	Ecuaciones de continuidad	74
5.	Metodología de Simulación	75
5.1.	Ecuaciones gobernantes	75
5.1.1.	Parametrización del cultivo	81
5.2.	Malla Computacional y condiciones de borde	83
5.2.1.	Construcción de la malla computacional	83
5.2.2.	Condiciones de borde	85
5.2.3.	Estabilidad Atmosférica	88
5.3.	Metodología de discretización	89
5.3.1.	Discretización de la ecuación general de transporte	90
5.3.2.	Discretización de ecuaciones de momento y continuidad	91

6. Calidad de simulaciones numéricas	97
6.1. Convergencia de malla	97
6.2. Eficiencia computacional	100
6.3. Estabilidad numérica	100
7. Resultados	102
7.1. Validación de resultados	102
7.2. Análisis termodinámico	103
7.2.1. Cálculo del número de Reynolds	111
7.3. Comentarios Generales	111
8. Conclusiones y Trabajo Futuro	114
Bibliografía	118

Índice de figuras

2.1. Localidades registradas por Boletín Agroclimática, ubicadas en las cercanías de Coinco.	28
2.2. Ubicación de Estaciones Meteorológicas.[23]	31
2.3. Enfriamiento que favorece la formación de heladas. [36]	32
2.4. Máquina de viento Orchard - Rite. [59]	35
2.5. Calefactor Central Orchard-Rite. [58]	36
2.6. Arreglo instalado en Sector A de Viveros de Copequen.	37
2.7. Gráfico de beneficio de la producción de cerezas de variedades Santina, Skeena y Lapins, dependiendo de la calidad del producto influenciada por daños producidos por la helada.	41
3.1. Máquina de viento fija (a) [2], Máquina de viento portátil (b) [62]	46
3.2. Diagramas de funcionamiento del sistema SIS. [25]	47
3.3. Principio de trabajo de la ventilación vertical aérea. [25]	48
3.4. Empresas destacadas y oferta de calefactores y/o quemadores para el control de heladas. [60]	49
4.1. Curva de crecimiento del fruto de cerezo [4]	57
4.2. Estados fenológicos del cerezo.[3]	58
4.3. Cuadro de floración y cosecha. [5]	61
4.4. Balance de energía de una superficie durante una helada radiativa, antes del alba y sin condensación [51].	72
4.5. Balance de energía de una superficie durante una helada radiativa, antes del alba y considerando condensación [51].	73
5.1. Evolución del LAD a través del ciclo fenológico de un cultivo de cerezo tipo Santina.	77

5.2. Evolución del LAD a través del ciclo fenológico de un cultivo de cerezo tipo Skeena.	78
5.3. Malla computacional en el plano yz.	84
5.4. Cultivos de cerezo en Viveros de Copequen	84
5.5. Geometría de simulación (a), con detalle en corte de hileras de árboles especie Santana (b) y Skeena (c)	85
5.6. Factores de relajación.	88
5.7. Discretización de la Ecuación General de Transporte en el Volumen de Control	89
6.1. Comportamientos residuales para una simulación en el mes de septiembre con una malla gruesa (a), media (b) y fina (c).	98
6.2. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xz a $y=35[m]$, los escenarios fríos característicos en septiembre 2020, con mallas fina (arriba), media (medio) y gruesa (abajo)	99
6.3. Comportamientos residuales para las simulaciones de enero, julio y septiembre.	101
7.1. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=0.3[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	105
7.2. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=1[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	106
7.3. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=3.3[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	107
7.4. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=18[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	108
7.5. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xz a $y=35[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	109
7.6. Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano yz a $x=134[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).	110

Índice de cuadros

2.1.	Resumen de la cantidad diaria de heladas en las localidades cercanas a Coinco, durante los meses críticos para las heladas. [15]	28
2.2.	Terminología de los eventos de helada y características típicas.	28
2.3.	Efectos de los elementos en la ocurrencia del fenómeno de la helada.	34
2.4.	Especificaciones técnicas máquinas de viento.[59]	35
2.5.	Especificaciones técnicas de máquinas de dos aspas.[59]	35
2.6.	Especificaciones técnicas del calefactor central.[58]	37
2.7.	Daño causado por la helada, en función de la temperatura límite.[37]	39
2.8.	Tabla de resumen de beneficio de la producción de cerezas de variedades Santina, Skeena y Lapins, dependiendo de la calidad del producto influenciada por daños producidos por la helada.	41
3.1.	Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas. [51]	43
3.2.	Tabla comparativa de las características técnicas de equipos de viento (superior) y calefactores (inferior) ofrecidas en Chile. [60]	44
3.3.	Trabajo representativo en la protección de heladas utilizando perturbación de viento.[25]	45
3.4.	Comparativa de características técnicas para sistemas de monitoreo.[60]	52
5.1.	Constantes de modelación para la parametrización del canopy. [14]	80
5.2.	Características de escenarios de estudio.	86
5.3.	Perfiles de velocidad iniciales.	87
5.4.	Perfiles de temperatura iniciales.	87
5.5.	Número de Richardson, Largo de Obukhov y Estratificación.	88
6.1.	Características de mallas de estudio	97
6.2.	Relación de refinamiento de mallas r.	97

6.3. Tiempo de simulación de diferentes escenarios.	100
7.1. Perfiles iniciales.	102
7.2. Número de Reynolds en las distintas capas del cultivo en distintos escenarios, diferenciando zona de cultivo Santina y Skeena.	111

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
$A(z)$	Densidad de área floreal	m^{-1}
$CD_{k\omega}$	Porción positiva del termino de difusión cruzada	-
C_d	Coeficiente de arrastre del canopy	-
C_μ, α_3, β_3	Constantes de modelo turbulento SST	-
C_p	Capacidad calorífica específica del fluido, a presión constante	$J/(kgK)$
d	Altura de desplazamiento en atmósfera neutral	m
d_{0u}	Altura de desplazamiento en atmósfera estratificada	m
F_1, F_2	Funciones de pared de modelo SST	-
F_F	Switch a zona forestal	-
$F_{B,i}$	Fuerza de flotabilidad por unidad de volumen, en la dirección i	$kg/(m^2s^2)$
$F_{Cor,i}$	Fuerza de Coriolis por unidad de volumen, en la dirección i	$kg/(m^2s^2)$
$F_{D,i}$	Fuerza de arrastre por unidad de volumen, en la dirección i	$kg/(m^2s^2)$
F_u	Flujo de moméntum	N/m^2
f	Parámetro de Coriolis	s^{-1}
g	aceleración de gravedad	m/s^2
H	Altura del cultivo	m
k	Energía cinética turbulenta	m^2s^{-2}
L	Largo de Monin-Obhukov	m
LA	Área de la hoja	m^2
LAD	Densidad de área foliar	m^{-1}
LAI	Índice de área foliar	-
p	Presión	Pa

P_k	Producción de esfuerzo cortante, por unidad de volumen	$\text{kg}/(\text{ms}^3)$
P_{kB}	Producción turbulenta de flotabilidad, por unidad de volumen	$\text{kg}/(\text{ms}^3)$
$P_{\omega B}$	Producción de flotabilidad por frecuencia de los vórtices, por unidad de volumen	$\text{kg}/(\text{m}^3\text{s}^2)$
Ri	Número de Richardson	-
Q_H	Flujo de Calor sensible	W
S_k	Producción de energía cinética turbulenta por arrastre forestal, por unidad de volumen	$\text{kg}/(\text{ms}^3)$
S_{ω}	Producción de frecuencia de vórtices por arrastre forestal, por unidad de volumen	$\text{kg}/(\text{m}^3\text{s}^2)$
t	Tiempo	s
$ U $	Módulo de la velocidad del viento	m/s
$\bar{U}$	Promedio de velocidad de viento en 10 min	m/s
$U(z)$	Velocidad a la altura z	m/s
$U_{i,j}$	Velocidad del viento en dirección en i,j	m/s
$U_{i,geo}$	Viento geostrófico en dirección en i	m/s
$U_{i,geo}$	Velocidad del viento en dirección en i,j	m/s
u^*	Velocidad de fricción	m/s
V_G	Volumen del suelo	m^3
x_i	Coordenada espacial, en dirección i	m
y_i	Coordenada espacial, en dirección i	m
z	Altura sobre el suelo	m
z_0	Largo de rugosidad aerodinámica	m
z_{0u}	Largo de rugosidad aerodinámica para atmósfera estratificada	m
z_{max}	Altura máxima de medición de A_{max}	m
α	Coeficiente exponencial de corte	-
β	Coeficiente de expansión térmica	K^{-1}
β^*	Constante utilizada en modelo $k - \omega$	-
$\sigma, \sigma_{\theta}, \sigma_k,$	Número de Prandtl turbulento para momentum, temperatura, k y ω	-

$\sigma_{\omega 2}, \sigma_{\omega 3}$		
σ_u	Derivación estandar de la velocidad de viento, cada 10 min, muestreado a una tasa de 1 Hz	m/s
ϵ	Tasa de disipación turbulenta	m^2s^{-3}
θ	Temperatura potencial	K
κ	Constante de Von Karman	-
λ	Conductividad del fluido	W/(mK)
μ	Viscosidad dinámica del fluido	kg/(ms)
μ_T	Viscosidad de vórtice	kg/(ms)
ν	Viscosidad cinemática del fluido	m^2/s
ρ	Densidad del fluido	kg/(m^{-3})
ω	Frecuencia turbulenta de los vórtices	s^{-1}

Capítulo 1

Introducción

Este proyecto, nace por solicitud la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF), quien tiene por finalidad realizar proyectos en investigación y desarrollo, aportando servicios y asesoría a la industria agrícola, en las líneas de fruticultura, entomología-cuarentenaria, Redclima, desarrollo y servicios. El escenario actual que viven los agricultores al hacerle frente al fenómeno de la helada es lo que motiva dicha solicitud, que inicia una investigación desarrollada en varias etapas, buscando dar una solución integral en los diversos aspectos que es necesario abordar, producto de la complejidad del fenómeno estudiado.

Al verse enfrentados al fenómeno de las heladas y evidenciar el impacto que esta tiene sobre los cultivos, agricultores del país comenzaron a invertir en torres anti-heladas. Sin embargo, no se cuenta con estudios que certifiquen o respalden las recomendaciones que los fabricantes entregan sobre su efectividad en la protección de los cultivos, pues las condiciones en las que trabajan los equipos son diversas y no necesariamente reflejan la realidad de los países de fabricación. La distribución de dichos equipos entre los cultivos se determina según las recomendaciones de los fabricantes, sin considerar las particularidades de cada cliente, como el marco de plantación del cultivo, complejidades en el terreno o condiciones ambientales propias de la zona. A pesar de lo anterior, hay quienes muestran satisfacción con el efecto y eficiencia sobre sus cultivos, mientras que otros, muy por el contrario, desconocen el porqué de la ineficiencia de estas.

Este trabajo es el segundo de una serie de investigaciones que pretende ayudar a la agroindustria. El primero, fue una simulación a meso escala, que estableció las condiciones de borde para la micro escala tratada. En el mundo, existen distintos

académicos que estudian el comportamiento de flujos estratificados sobre cultivos, Nebenfür y Davidson desarrollaron un número de LES para un flujo sobre un bosque horizontalmente homogéneo, observando que el transporte de presión juega un rol importante, entregándole energía cinética turbulenta a la región del cultivo.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Generales

Se tiene como objetivo general el desarrollo de una metodología que permita reproducir el fenómeno de la helada mediante la simulación a micro escala, en el área correspondiente al Campo Viveros de Copequen. Esto, con el fin de poder entender la dinámica y comportamiento térmico del flujo, y así realizar recomendaciones fundamentadas al mundo agricultor.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudiar y definir la problemática del efecto de las heladas en la producción agroindustrial, específicamente de cerezas.
- Presentar los principales avances tecnológicos y científicos en el campo de estudio, incluyendo equipos, patentes, métodos y estudios realizados.
- Investigar el marco de plantación y las condiciones atmosféricas, para producir un modelo matemático que sea capaz de reproducir el fenómeno de heladas en la zona.
- Simular numéricamente el flujo de viento estratificado, correspondiente al fenómeno físico de heladas en cuadrante de modelación micro escala.
- Generar recomendaciones respecto de la prevención de daños por heladas, en Viveros de Copequen.
- Explicitar trabajo futuro.

1.2. Estructura del Documento

La estructura del trabajo es la siguiente:

- Cap. 2: Se explica detalladamente la problemática a trabajar, describiendo el contexto, describiendo y caracterizando la situación.
- Cap. 3: Se exponen los últimos avances, problemáticas y consensos en torno a la simulación atmosférica sobre cultivos, que son el núcleo del trabajo realizado.
- Cap. 4: Sienta las bases conceptuales, matemáticas y físicas sobre las cuales se desarrolla la investigación. Aquí se abordan: conceptos básicos sobre el cerezo, la helado como fenómeno atmosférico, se caracteriza termodinámicamente la atmósfera y se presentan las ecuaciones gobernantes.
- Cap. 5: Muestra la filosofía y configuración de la simulación, se establece la parametrización de las ecuaciones gobernantes. Luego, se revisa la construcción de la malla computacional y condiciones de borde, para finalmente detallar la metodología de discretización.
- Cap. 6: Se evalúa la calidad computacional de las simulaciones realizadas.
- Cap. 7: Se presentan los resultados más relevantes.
- Cap. 8: Conclusiones, trabajo futuro y aspectos que quedan abiertos a la mejora.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

2.1. Enfoque de la investigación

Se propone estudiar el fenómeno de la capa fría de aire denominada helada en la localidad de Copequen. En particular, cómo se asienta, su tiempo de residencia, fenomenología, entre otros. Con el fin de poder establecer los efectos negativos de la helada sobre los cultivos de cerezo ya existentes en Viveros de Copequen, teniendo en consideración las características del cultivo de cerezo, tales como: rugosidad de la vegetación, etapas del crecimiento, mantenimiento de la planta, ubicación geográfica, entre otras.

Se acotará el problema a la simulación en la “micro escala” (en orden de metros) del viento en torno al espacio acotado, buscando establecer las condiciones apropiadas para lograr el funcionamiento óptimo de las torres anti-heladas instaladas actualmente en la localidad de Coinco. Para esto, se utilizará un método de simulación numérica, que implica un re análisis de datos históricos en el sitio, que brindará las condiciones de borde para una micro escala anidada dentro de la meso escala simulada.

La documentación del impacto negativo real de las heladas, tanto radiativas como advectivas, es crucial en la cuantificación del mismo. Considerando que la pérdida de producto frutícola debido a la helada es algo que hoy en día los productores asumen como inevitable, provocando un aumento de precio en las cerezas y, por lo tanto, disminuyendo la utilidad total del producto.

2.2. Contexto

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de valor de agua a hielo; sin embargo, la palabra es comúnmente utilizada para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación [51]. Para efectos de este informe, se define helada cuando la temperatura mínima diaria indica un valor de 0°C o inferior, medido en cobertizo a 1,50 metros del suelo. [41]

La helada produce daños celulares en la planta, pues se congela el agua a nivel intracelular, produciendo deshidratación o ruptura de esta, entre otros. Además, existe la posibilidad de que ingresen agentes patógenos por las heridas producidas por el hielo o destrucción de yemas y flores, impidiendo que se transformen en frutos. En caso de que la helada sea tardía, que ocurra en primavera, los frutos en formación resultan dañados y los que sobreviven resultan con malformaciones.[13]

En 2019, no es posible estimar el porcentaje de daños debido a lo reciente de las heladas, además de los diferentes estados fenológicos de los diferentes árboles frutales. Como es recurrente en las heladas, las pérdidas son variables dependiendo del sector y la protección, sin embargo, los mayores daños se esperan en cerezos, kiwis, carozos y arándanos. Los sectores más afectados pueden llegar hasta un 80 % de pérdida en plantaciones cuajadas de cerezos y arándanos, en términos de región (RM y VI), se espera una reducción de 25 % sobre el potencial[22]

El Ministerio de Agricultura de Chile, a través de su Boletín Agroclimático informa los días del mes donde se presentaron temperaturas bajo los 3°C y los 0°C, medidas en distintas zonas del país. La Figura 2.1, muestra las localidades registradas cercanas a Coinco, con una distancia de 21 y 35 [km] de distancia a Rancagua y San Fernando, respectivamente.

La ocurrencia de las heladas se espera en el período de invierno y primavera. Para las plantaciones de cerezo, los meses más críticos son los de agosto y septiembre, por lo que se resumen en el Cuadro 2.1 para su posterior análisis.

Del Cuadro 2.1 se aprecia que las heladas han ido aumentando su frecuencia con el paso de los años, especialmente en el mes de agosto. Los días en que la temperatura



Figura 2.1: Localidades registradas por Boletín Agroclimática, ubicadas en las cercanías de Coinco.

Cuadro 2.1: Resumen de la cantidad diaria de heladas en las localidades cercanas a Coinco, durante los meses críticos para las heladas. [15]

		2017		2018		2019	
		Agosto	Septiembre	Agosto	Septiembre	Agosto	Septiembre
Rancagua	Bajo 3 [°C]	11	7	9	5	11	8
	Bajo 0 [°C]	0	0	5	0	5	1
San Fernando	Bajo 3 [°C]	5	5	5	1	15	5
	Bajo 0 [°C]	0	0	7	0	4	0

es positiva, pero bajo 3°C, se producen las denominadas heladas radiativas, éstas están asociadas con el enfriamiento debido a la pérdida de energía por el intercambio radiante durante las noches despejadas y en calma, y con inversiones de temperatura. Los días en que la temperatura cae bajo los 0°C, se producen las denominadas heladas advectivas, que están asociadas con incursiones a gran escala de aire frío con una atmósfera con viento y bien mezclada y una temperatura que a menudo está por debajo de cero, incluso durante el día. El Cuadro 2.2 muestra el resumen de las características de las heladas por radiación y advección.

Cuadro 2.2: Terminología de los eventos de helada y características típicas.

Tipo de helada	Características
Por Radiación	Despejado, calma, inversión, la temperatura es mayor a 0°C durante el día.
Por Advección	Ventoso, sin inversión, la temperatura puede ser menor a 0°C durante el día.

Si bien la presencia de helada es un factor que influye en el crecimiento de los frutales y en el desarrollo de sus fases fenológicas, no es el único. Se deben tener en cuenta factores como las horas-frío y los grados-día, las horas-frío se obtienen contabilizando el número de horas en que la temperatura es igual o menor a 7°C, es necesario que se acumulen mensualmente determinadas cantidades de horas-frío para

iniciar o acelerar la floración de los árboles frutales de hoja caduca (como es el cerezo). De acuerdo a la información entregada por el Ministerio de Agricultura, basándose en los datos registrados en los últimos cuatro años, es de esperar que se hayan cumplido los requerimientos de frío en frutales caducos, en gran parte del territorio (incluyendo el área de interés), lo que permitiría el cumplimiento de las próximas etapas de desarrollo sin retrasos. Por lo que se puede asumir que esta variable no tuvo incidencia en la pérdida de plantaciones de cerezas en estudio.

Los grados-día se relacionan con el hecho de que el crecimiento de una planta es dependiente de la cantidad total de calor a la cual estuvo expuesta durante sus fases fenológicas, el tiempo entre cada fase es inversamente proporcional a la temperatura y se considera una relación lineal entre el crecimiento y la temperatura. Se considera 10°C como la temperatura base del crecimiento y desarrollo de las fases fenológicas para la mayoría de los cultivos (incluyendo los cerezos), pues se parte de la premisa que toda temperatura superior a este umbral térmico es asimilada como calor por el cultivo o árbol frutal, Según la información entregada por el Ministerio de Agricultura, “se observa una acumulación de temperatura levemente inferior respecto del mismo mes durante la temporada anterior 2018-2019 (01 mayo – 30 abril)”, pero “las diferencias son tan mínimas que es probable que se puedan mantener los programas de labores y aplicaciones en las mismas fechas” [15]

2.2.1. Cambio Climático

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros meteorológicos: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, etc. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas (derivadas de la acción del hombre).[16]

El término suele usarse de manera poco apropiada, para hacer referencia tan solo a los cambios climáticos que suceden en el presente, utilizándolo como sinónimo de calentamiento global. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático usa el término «cambio climático» sólo para referirse al cambio por causas humanas. Por cambio climático "se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables.

Además del calentamiento global, el cambio climático implica cambios en otras variables como las lluvias y sus patrones, la cobertura de nubes y todos los demás elementos del sistema atmosférico. La complejidad del problema y sus múltiples interacciones hacen que la única manera de evaluar estos cambios sea mediante el uso de modelos computacionales que simulan la física de la atmósfera y de los océanos. La naturaleza caótica de estos modelos hace que en sí tengan una alta proporción de incertidumbre, aunque eso no es impedimento para que sean capaces de prever cambios significativos futuros.

Entre los incidentes más grandes generados por las heladas está el ocurrido en septiembre de 2013, que afectó desde la región de Coquimbo hasta la región del Maule, como lo declara ODEPA: “De acuerdo con información de Fedefruta F.G., las especies frutales más afectadas fueron los carozos representados por nectarinos, duraznos, ciruelos y cerezas, que vieron comprometida entre el 35 % y 61 % de su superficie de plantaciones en el país. En segundo lugar, la especie que presenta un mayor daño corresponde a los almendros, que alcanzan un 57 % de hectáreas afectadas, y después los kiwis con un 48 %, mientras que la uva de mesa, un 20 %. También hay que considerar daños en arándanos y perales. El incidente ocurrió entre el 16 y el 23 de septiembre, desde la III a la VII región de Chile, siendo la más severa la del día 17 de septiembre, que alcanzó entre -4 a -5 [°C] por 5 horas en la Región Metropolitana (RM) y VI región”. [45]

Otro caso más actual fue registrado durante el mes de enero de 2019 en la zona de Pucón, Cunco, Vida Nueva y Villarrica (región de La Araucanía) donde la temperatura fue inferior a los 0 [°C] en verano, coincidiendo con la producción de Arándano, frutal de importancia en la zona. La principal zona afectada fue la región de O’Higgins, donde se identificó un 55 % de su superficie de huertos dañada, seguida por la región Metropolitana con un 45 %, la del Maule con un 40 % y las de Atacama, Coquimbo y Valparaíso con un 15 %. [19]

2.3. Descripción y Caracterización

El fenómeno de estudio es complejo y diverso, pues involucra factores geográficos, meteorológicos, biológicos y económicos, que influyen directamente en la problemática en la que se enfoca la investigación. A continuación, se describirán y/o caracterizarán cada uno de ellos, con el fin de abarcar la situación desde una perspectiva global, que permita determinar una manera integral de solucionar las complejidades que se enfrentan.

2.3.1. Descripción Geográfica

El lugar de estudio corresponde a plantaciones de cerezo ubicadas en Copequen, provincia de Cachapoal, en la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Dentro del campo se tienen veletas dispuestas en forma horizontal cada tres metros, además de sensores de temperatura y humedad relativa cada un metro y medio, separados por treinta metros con un total de seis.

Si bien se tienen datos empíricos puntuales dentro del terreno, se necesitan condiciones de borde para estudiar el fenómeno con mayor precisión, para esto, se cuenta con un estudio previo basado en la información registrada por la estación meteorológica de Copequen y de las estaciones de Agroclima, Las Petacas (El olivar), Requinoa y Quinta Del Tilcoco [23]. Éste fue necesario debido a las complejidades del terreno encerrado por las torres mencionadas anteriormente, mostrado en la Figura 2.2.

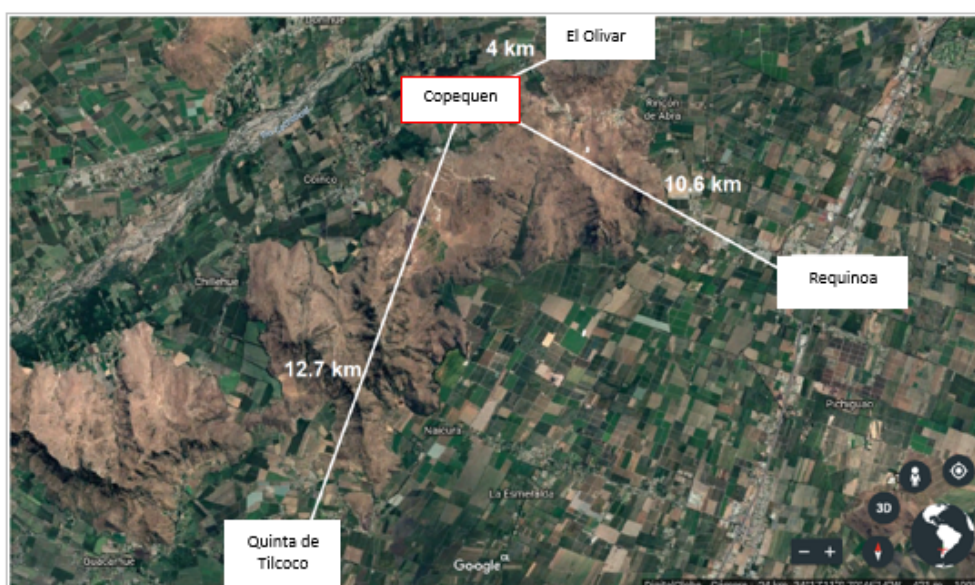


Figura 2.2: Ubicación de Estaciones Meteorológicas.[23]

En la figura anterior, se observa que el suelo del sector “micro escala” es principalmente de uso agrícola de monocultivo, lo que implica que todo el cultivo es de la misma altura. El sitio está rodeado por edificaciones rurales de baja altura, ninguno de ellos supera como cota máxima los 10 [m] de altura, a excepción de algunos silos y estanques de agua, que llegan hasta los 20 [m].

Para ambas especies, el marco de plantación es similar en relación con la altura y distribución de los cerezos. Los árboles se ordenan cada 2.5 [m] entre hileras separadas por 4.5 [m], cada árbol es cortado para limitar su altura a 3,2[m]. Cuando se encuentran a tope de follaje, éste corresponde al 35 % del área entre hileras, es decir, que entre dos hileras el follaje de ambos árboles ocupará un máximo de 70 %.

2.3.2. Factores Meteorológicos

Se llaman fenómenos meteorológicos a aquellos cambios de la atmósfera que modifican a las condiciones del tiempo, se les denomina macro meteorológicos cuando éstos abarcan extensas zonas del planeta [10]. Los factores macro meteorológicos condicionan tanto la época de ocurrencia como la extensión de regiones donde se desarrollan las heladas. Dentro de ellos se encuentran el balance regional de la radiación y la circulación general de la atmósfera.

La atmósfera recibe energía proveniente del Sol en forma de radiación. Una fracción de la energía es absorbida por la tropósfera, otra parte se dirige al exterior al ser difundida desde la atmósfera hacia el espacio y el resto llega a la superficie de la Tierra. Cuando de una región de la superficie terrestre se desprende mayor cantidad de calor que la que recibe, ocurre un enfriamiento que favorece a la formación de la helada, como se muestra en la Figura 2.3. Los balances de radiación en una zona de la superficie terrestre no son los mismos a lo largo del tiempo, y dependen de la ubicación sobre la Tierra.

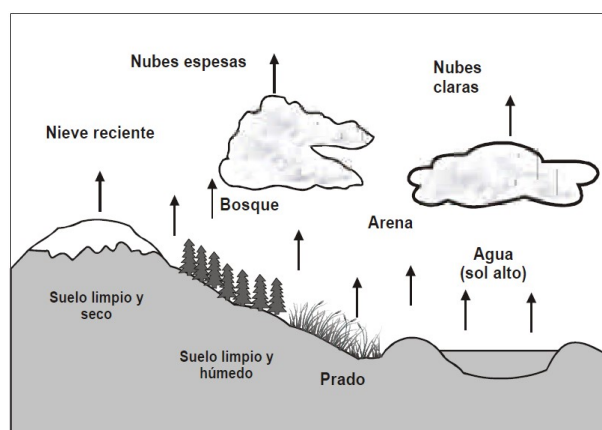


Figura 2.3: Enfriamiento que favorece la formación de heladas. [36]

El movimiento del aire se realiza desde una zona de alta presión atmosférica a una de baja presión. Al conjunto de vientos sobre la Tierra, a gran escala, se le denomina

circulación general de la atmósfera. Las masas de aire entre las zonas de 30° de latitud norte y sur, que se desplazan como corrientes descendentes hacia las áreas del ecuador (región de bajas presiones) se nombran vientos alisios. Así pues, la región donde estos se debilitan se identifica como calma ecuatorial. Aun cuando casi todo el aire cálido que se asienta en las franjas a 30° de latitud norte y sur vuelve hacia el ecuador, una parte sigue desplazándose hacia los polos. A los 60° de latitud norte y sur, el aire entra en contacto con el aire polar frío, a estos últimos se les denominan frentes polares.

Factores Meteorológicos

El estado de la atmósfera se manifiesta a través de elementos meteorológicos, como son la temperatura, la precipitación, la humedad, la dirección y velocidad del viento, la presión atmosférica, la nubosidad, la radiación solar y la visibilidad. Éstos varían de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Los principales elementos del tiempo que influyen en la formación de las heladas son el viento, la nubosidad, la humedad atmosférica y la radiación solar. [36]

El viento es fundamental para que se desarrolle una helada, pues cuando hay corrientes de aire se mezcla el aire frío, que se encuentra cercano al suelo, con el más caliente que está en niveles superiores, lo que hace más difícil el desarrollo de una helada. Por tanto, una de las condiciones que favorece la ocurrencia de heladas es la ausencia de viento.

Cuando el cielo está cubierto por nubes, estas disminuyen la pérdida de calor del suelo por radiación hacia la atmósfera y devuelven parte de ese calor a la Tierra. Para que ello ocurra, la temperatura del aire en movimiento debe ser mayor a la del punto de rocío. Cuando sigue descendiendo la temperatura puede llegar a los 0 [°C] y el vapor de agua que contiene produce una capa delgada de hielo delgada, conocida como escarcha blanca. Si en la noche el cielo está despejado, la pérdida de calor desde la superficie de la Tierra es continua. Así disminuye el calor de la tierra y con ello se favorece la ocurrencia de las heladas.

Si la temperatura disminuye a los 0 [°C] o menos y el viento es escaso, el vapor de agua contenido en el aire se condensa. Si la humedad es abundante, ésta produce niebla y cuando tiene poco contenido de humedad, se forma la helada. Por ello una gran humedad atmosférica reduce la probabilidad de ocurrencia de heladas. Parte de la

humedad presente en la atmósfera es la producida por la evapotranspiración de las plantas y no se puede perder de vista el impacto que ésta tiene, el suelo actúa como una esponja, que se irá “secando” a medida que reciba radiación solar.

Cabe destacar que el vapor de agua funciona como un escalón activo en el campo de flujo, es decir, cambia la dinámica del flujo. El vapor de agua absorbe más radiación visible y cercana al infrarrojo que cualquier otro componente constitutivo de la atmósfera. Producto de la absorción de radiación solar por parte del vapor de agua se observa un calentamiento diabático de la atmósfera y una consecuente reducción del flujo radiativo que llega a la superficie, calentando el aire en mayor medida.

Una cantidad de radiación solar es absorbida por la superficie de la Tierra y otra es devuelta desde su superficie a la atmósfera. Cuando los días son más cortos y las noches más largas, aumenta la ocurrencia de heladas. Aunque exista una menor acumulación de calor en el suelo, habrá un mayor tiempo para que se transmita hacia el aire.

El Cuadro 2.3 muestra un resumen de los efectos de los elementos meteorológicos en la ocurrencia del fenómeno de la helada:

Cuadro 2.3: Efectos de los elementos en la ocurrencia del fenómeno de la helada.

Elemento	Efecto
Viento	Su ausencia favorece la ocurrencia de heladas.
Nubosidad	Noches con cielo despejado favorece la ocurrencia de heladas.
Humedad atmosférica	Una gran humedad atmosférica reduce la probabilidad de ocurrencia de helada.
Radiación	Días más cortos y noches más largas favorece la ocurrencia de heladas.

2.4. Equipos utilizados

Hoy en día, los métodos activos para la protección de helada son los preferidos por agricultores, en particular, las máquinas de viento son el sistema más adoptado en el mundo para el control del daño por heladas en la industria frutícola. Una máquina de viento se compone por una hélice de gran tamaño (similar a la de un helicóptero) montada sobre una torre, la que es accionada por un motor industrial que permite impulsar un gran flujo de aire sobre el terreno. La acción de este flujo retrasa la caída de temperatura producida por la helada, protegiendo a las plantaciones de sus efectos.

Los equipos utilizados en Viveros de Copequen son ofrecidos por Tecnipak, representante en Chile de la empresa norteamericana Orchard-Rite, estos se muestran en la Figura 2.4. Cada máquina de viento protege una superficie promedio de 7,4 hectáreas, que varía en función del modelo, la topografía del terreno, la especie protegida, su edad y la severidad de las heladas esperadas en la zona protegida. [59]



Figura 2.4: Máquina de viento Orchard - Rite. [59]

Tecnipak ofrece dos equipos, que se caracterizan por la cantidad de aspas de la hélice, dos o cinco. La hélice de dos aspas es la más eficiente, moviendo la mayor cantidad de aire para una potencia determinada, mientras que la de cinco aspas fue desarrollada para solucionar desventajas de ruido. Los Cuadros 2.4 y 2.5 muestran especificaciones técnicas de las máquinas instaladas, es decir, de dos aspas:

Cuadro 2.4: Especificaciones técnicas máquinas de viento.[59]

Modelo	2600 - Gas	2700 - Diesel
Motor	Ford V10	Caterpillar 7.1 Turbo
Superficie de cobertura promedio	7,2 hectáreas	7,4 hectáreas
Radio de cobertura promedio	152 metros	154 metros
Consumo medio de combustible	56 litros/hora	35 litros/hora
Potencia durante operación	174 HP	177 HP
Altura de la torre	10,67 metros	10,67 metros
Hélice de fibra de vidrio de dos aspas	6,05 metros	6,15 metros
Fuerza de empuje	2.010 libras	2.040 libras

Cuadro 2.5: Especificaciones técnicas de máquinas de dos aspas.[59]

Modelo	Cantidad de aspas	RPM Motor	Cobertura nominal [hectáreas]	Ruido a 300[m] [dB(A)]	Consumo [t/h]	Potencia [HP]
2700	2	2.230	7,46	67	35,0	177
		1.950	5,66	64	23,4	118

El sistema de monitoreo y control remoto instalado permite controlar los parámetros esenciales de las máquinas de viento, tales como la temperatura de encendido y de apagado. También permite poner en marcha y detener los equipos remotamente, así como recibir alertas cuando un parámetro excede un valor límite definido, lo que resulta útil para anticipar posibles emergencias. En el lugar de estudio, el encendido de los equipos es automático, al detectar la temperatura establecida, giran en un ángulo de 360° y tienen una inclinación de aspas de 6° .

En Chile, el comportamiento de las heladas ha cambiado en los últimos años, volviéndose cada vez más intensas, esto ha implicado que en sectores donde antes no se evidenciaban heladas ahora se ha comenzado a sufrir por este fenómeno. Debido a esto, Tecnipak recomienda a sus clientes incluir un calefactor central, desarrollado por Tecnipak en conjunto con Orchard-Rite. El calefactor es mostrado en la Figura 2.5:



Figura 2.5: Calefactor Central Orchard-Rite. [58]

Algunas de las torres ubicadas en el terreno cuentan con el sistema de calefacción central, que consta con ocho cámaras de combustión capaces de producir hasta 1,7 [MW] de calor para subir la temperatura de la masa de aire que desplaza la máquina. En algunos casos, según la duración de la helada, los termo ventiladores son capaces de combatir heladas advectivas sacrificando radio de cobertura. Cada cámara de combustión cuenta con un inyector de petróleo diésel y una bujía incandescente para su encendido, con partida manual 2.5. El Cuadro 2.6 muestra las especificaciones técnicas del calefactor central:

Cuadro 2.6: Especificaciones técnicas del calefactor central.[58]

Cantidad de cámaras	8 (permite operar al 50 % con 4 cámaras)
Potencia nominal en kilowats	1.164 (ó 582) kW
Potencia nominal en BTU/hr	3.972.000 (ó 1.986.000) BTU/hr
Consumo de petróleo diesel	120 (ó 60) litros/hr
Presión de trabajo	230 psi
Sistema de encendido	Bujía incandescente activada por pulsador
Capacidad de combustible	1.000 litros

2.4.1. Equipos en Viveros de Copequen

Viveros de Copequen cuenta con cuatro máquinas de viento instaladas actualmente, todas ellas corresponden al modelo 2600 Gas Orchard-Rite y cuentan con calefactores centrales, éstas fueron compradas bajo el concepto de protección nominal de cinco hectáreas por máquina. De las cuatro máquinas instaladas, solo una se encuentra en el área de análisis y se muestra en la Figura 2.6.

**Figura 2.6:** Arreglo instalado en Sector A de Viveros de Copequen.

El funcionamiento de las máquinas puede ser manual o automático, por preferencia de los operadores, éstas se accionan de forma manual. El encendido de las máquinas de viento se produce cuando la temperatura es menor o igual a los 2 [°C], mientras que los calefactores se encienden cuando la temperatura cae bajo niveles de 2 a 3 grados bajo

cero.

Actualmente, se cuenta con un estudio interno realizado por la Fundación de Desarrollo Frutícola (FDF) en relación al funcionamiento real del conjunto máquina de viento – calefactor instalados actualmente en el campo Viveros de Copequen. Este concluye que el conjunto funciona a sólo un 30 % de eficiencia en relación a lo informado en la ficha técnica del mismo, calefaccionando un área de 50 [m] a la redonda en vez de 150 [m], que fue ratificado con la medición en terreno, realizando la medición de la velocidad del viento caliente utilizando un anemómetro.

Realizando un análisis preliminar, se observan 2 posibles causas de esta diferencia de eficiencia. La primera, incluye al hecho de que las mediciones realizadas por el proveedor fueron realizadas en un laboratorio de condiciones controladas donde generalmente se utilizan vientos de estratificación térmica neutra, donde el aire puede moverse rápidamente y el flujo es generado principalmente por un efecto mecánico, más que térmico. Mientras que en realidad se presenta un flujo estable, donde el aire es muy frío, por lo que “absorbe” la turbulencia, limitando la transferencia de cantidad de movimiento y energía, disminuyendo la velocidad y, por lo tanto, el alcance del viento caliente. Una segunda observación es que la concepción del sistema de transferencia de calor utilizando la calefacción por combustión no es la óptima, pues el aire sobre la llama es más liviano, se va para arriba rápidamente, produciendo que solo una porción de este sea aprovechada por las aspas, y el resto se pierda hacia la parte superior de la atmósfera.

Hoy en día, Tecnipack es la única oferta de este producto en el mercado chileno y ofrece productos de marcas de renombre, que genera confianza en la población. Sin embargo, el distribuidor no observa el cultivo al momento de ofrecer los equipos, por lo que no puede garantizar la efectividad de dicho conjunto para el cultivo particular. Alguna de las preguntas que surgen es cómo corregir esta baja de eficiencia, sin embargo, el objetivo de este estudio no es responder dicha pregunta, sino enfocarse en el impacto de la helada en el cultivo.

2.5. Efectos y síntomas

Los cultivos son vulnerables a la helada cuando la temperatura del aire desciende lo suficiente como para formar cristales de hielo en el interior de sus células durante

cierto tiempo. En particular, la temperatura de congelación más alta para la cereza dulce (*Prunus avium*), que es la presente en el campo Viveros de Copequen, es de $-2,1$ [°C] [1]. La severidad de una helada depende de la magnitud de la disminución de temperatura en el aire y de la resistencia de los seres vivos a ellas, el cuadro 2.7 muestra el daño causado por la helada, en función de la temperatura límite. Además, el proceso de deterioro de las plantas depende del estado vegetativo en que se encuentre y de la especie a la que pertenece.

Cuadro 2.7: Daño causado por la helada, en función de la temperatura límite.[37]

Temperatura límite [°C]	Daño Causado
0 a -2	Daños en flores y daños leves en hojas y frutos
-2 a -3	Severos en frutos y hojas
-3 a -9	Estructura del árbol
Menos de -9	Posible muerte del árbol

El daño y posible muerte de los frutos afecta directamente la producción e indirectamente la economía de la empresa y el país. Tanto los aspectos propios del fruto, productivos como económicos se desarrollan a continuación. Cabe mencionar que la calidad de exportación se encuentra dentro del primer rango, los frutos que sobreviven en el segundo rango se utilizan para comercio nacional y se intenta vender en el menor tiempo posible, pues debido a su baja calidad la duración del fruto es menor.

2.5.1. Efectos productivos

En 2013, Viveros de Copequen sufrió la pérdida total de la producción. Este hecho incentivó a la compañía a incorporar métodos de protección contra heladas, con el fin de lograr solventar las pérdidas frente a la ocurrencia de un fenómeno de helada de gran magnitud. En años anteriores, se utilizaba ventilación aérea por medio de helicópteros, pero debido a la complejidad y altos costos de operación, se optó por la instalación de máquinas de viento con calefactor central descritas anteriormente como método de protección activo.

A pesar de haber tenido pérdida total en los últimos años, se tiene consciencia de que la ocurrencia del fenómeno de la helada no tiene un patrón fijo y puede generar pérdidas parciales e incluso totales en la producción. Uno de los objetivos es evitar la baja en la producción debido al daño por heladas, ya sea por muerte de plantas o por

disminución de calidad del producto. Se busca cubrir los costos generados, maximizando los beneficios, conservando el valor del kilogramo de cereza, que está relacionado con parámetros de tamaño y color, condicionados por la ocurrencia de helada en los diferentes estados fenológicos que se encuentre la planta.

2.5.2. Impacto económico

En 2016, las heladas entre el 31 de agosto y el 3 de septiembre afectaron diversas regiones del país, el impacto difiere según zona, duración de la helada y cultivo, inclusive para una misma zona existió variación según localidad específica, de ninguna manera se puede calificar como un daño generalizado.

En la zona central, se vieron afectados cerezos y carozos: ciruelos, perales y sobre todo almendros. En la región de OHiggins, la especie más perjudicada fue el cerezo, existen alrededor de 9000 hectáreas de este cultivo, en las variedades tempranas como Oneal, Emerald y Jewel, entre otras. También los cultivos de uva de mesa afectadas antes de dar brote con pérdidas de entre 20 a 30 %.

En las zonas precordilleranas de la región del Maule como el Romeral, Molina y San Clemente, las pérdidas rondaron entre el 15 y 20 % para variedades tempranas de cerezo como la Santina. Los cultivos de arándanos de variedad temprana se vieron afectados de mayor manera en sectores como Longaví, Parral y Linares, con una pérdida de entre el 20 a 30 % según la zona. La uva vinífera también se vió afectada en zonas donde ya existían brotes de variedades Chardonnay y Viognier.

En la zona norte, región de Coquimbo, provincia del Choapa, se dieron las condiciones más extremas por la duración de las heladas, del orden de once horas. La especie más perjudicada fue el damasco, que presenta una superficie de plantaciones de 260 hectáreas aproximadamente (34 % a nivel nacional), con pérdidas de entre el 50 y 100 % según el huerto y la variedad: Dina y Tilton. Otra especie afectada fueron los paltos y nogales, con daños en flores y brotes respectivamente.

Particularmente en el campo Viveros de Copequen, las variedades de cereza que más utilidades generan son la Skeena, Santina y Lapins, de los cuales se producen 22, 20 y 12 mil kilogramos anuales respectivamente. Considerando cero pérdidas de calidad producto de las heladas, estas variedades pueden alcanzar un precio de venta máximo

de 6 [USD/kg], generalmente sólo un 20 % de la producción alcanza dicho estándar. [22] Para el 80 % restante, el precio disminuye a un valor entre 5 a 3 [USD/kg], si se considera un promedio de 4 [USD/kg], se tiene un precio de venta del total de la producción de 237,6 [MUSD]. El precio de venta del kilogramo se ve directamente afectado por la ocurrencia de heladas, en caso de que los estándares de color y tamaño bajen lo suficiente se puede llegar a un mínimo de 162 [MUSD], considerando que se conserva el 100 % de la producción, pudiendo resultar en cero en caso de pérdida total, como sucedió en 2013. El Cuadro 2.8 resume lo explicado anteriormente, mientras que la Figura 2.7 lo muestra gráficamente:

Cuadro 2.8: Tabla de resumen de beneficio de la producción de cerezas de variedades Santina, Skeena y Lapins, dependiendo de la calidad del producto influenciada por daños producidos por la helada.

	Santina			Skeena			Lapins			Beneficio Total [USD]
Precio [USD/kg]	6	4	3	6	4	3	6	4	3	
Máximo calidad [kg]	22.000			20.00			12.000			324.000
Calidad promedio [kg]	4.400	17.600		4.000	16.000		2.400	9.600		237.000
Mínima Calidad [kg]			22.000			20.000			12.000	162.000

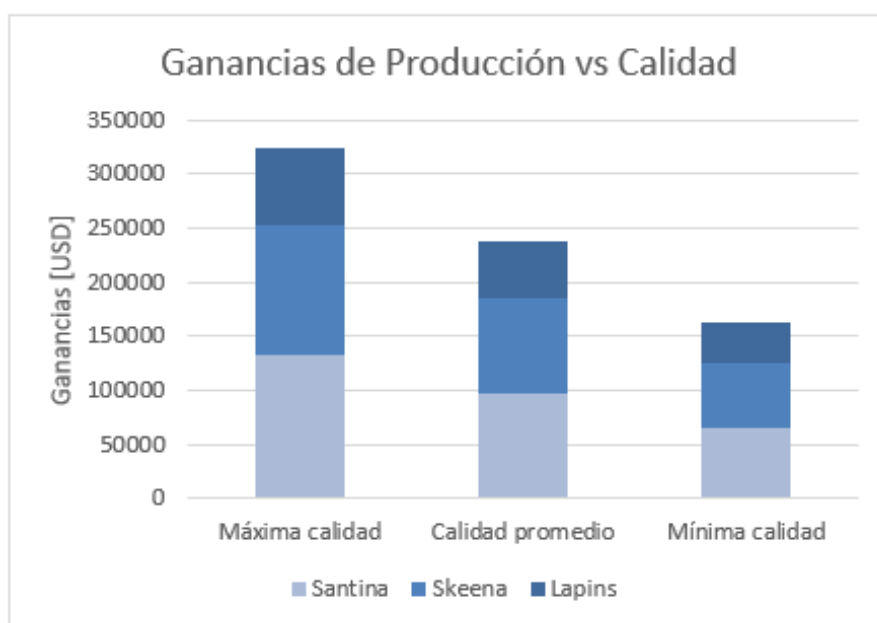


Figura 2.7: Gráfico de beneficio de la producción de cerezas de variedades Santina, Skeena y Lapins, dependiendo de la calidad del producto influenciada por daños producidos por la helada.

Capítulo 3

Estado del Arte

Actualmente, nos encontramos en un entorno cada vez más complejo y cambiante, por lo tanto, resolver los problemas de Investigación y Desarrollo no es suficiente, también es importante innovar, es decir, convertir tales conocimientos en nuevos productos, procesos y/o servicios, con una propuesta de valor atractiva para el mercado. Detectar oportunidades y anticiparse a los cambios es un reto y desafío constante para la supervivencia de las empresas, lo cual demanda realizar un seguimiento constante del entorno en el que ésta se desenvuelve.

En este capítulo se estudiará el panorama científico y tecnológico para los métodos de control y prevención de heladas. Además, se revisarán los parámetros operacionales, de funcionamiento y control de las máquinas de control presentes en el mercado. Por otro lado, se presenta la vanguardia en modelación numérica, tanto de modelos para el flujo como para la caracterización de sólidos, como son los árboles.

3.1. Control de heladas

Las técnicas de protección contra heladas se dividen en métodos pasivos y activos. Los métodos pasivos son los que actúan en términos de prevención, normalmente para un periodo largo de tiempo y cuyas acciones son particularmente beneficiosas cuando se producen las condiciones de helada. Los métodos activos son temporales y requieren intensamente energía o trabajo, o ambos. Los métodos pasivos se relacionan con técnicas biológicas y ecológicas, e incluyen prácticas llevadas a cabo antes de las noches de helada para reducir el potencial de daño. Los métodos activos se basan en métodos físicos e intensivos desde el punto de vista energético, requieren esfuerzo en el día previo o durante la noche de la helada. El Cuadro 3.1 presenta una clasificación de los métodos:

Cuadro 3.1: Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas. [51]

Categoría	Sub-Categoría	Métodos de Protección
Pasiva	Biológica (evitación o resistencia)	Inducción de resistencia a la congelación sin modificar la genética de las plantas Tratamiento de las semillas con agroquímicos Selección de plantas y mejora genética Selección de especies por el momento de desarrollo fenológico Selección de fechas de plantación para cultivos anuales una vez la probabilidad de helada en primavera ha disminuido Reguladores del crecimiento y otras sustancias químicas
	Ecológica	Selección de emplazamiento para cultivar Modificación del paisaje y microclima Control del estado nutritivo Manejo del Suelo Control de la cobertura del cultivo (malas hierbas) y otras coberturas
Activa	Coberturas y radiación	Materiales orgánicos Coberturas con soporte Coberturas sin soporte
	Agua	Aspersores sobre las plantas Aspersores bajo las plantas Micro - aspersores Riego por superficie Niebla artificial
	Estufas	Combustible sólido Combustible líquido Propano
	Máquinas de viento	Horizontal Vertical Helicópteros
	Combinaciones	Ventiladores y estufas Ventiladores y agua

El mecanismo de protección instalado en Viveros de Copequen corresponde a un método activo, que es una combinación de ventiladores y estufas. Cabe mencionar que muchos esfuerzos han fracasado a la hora de usar ventiladores para distribuir el calor complementario a través o cerca de ellos. Las estufas con combustibles fósiles situadas demasiado cerca de los ventiladores causan el ascenso de corrientes de aire, disminuyendo la eficacia del ventilador. Según la FAO, “No se necesitan estufas dentro de los 50[m] del

radio de acción del ventilador” [51]. En el Cuadro 3.2 se presenta la oferta en Chile, de los métodos de protección activos: máquinas de viento y calefactores.

Cuadro 3.2: Tabla comparativa de las características técnicas de equipos de viento (superior) y calefactores (inferior) ofrecidas en Chile. [60]

Equipo	Área que cubre	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Precio
Wind Machines (Orchard Rite)	7,4 hectáreas	Dos modelos: gas y diesel	Mod gas: 63 lt/hr Mod diesel: 35 lt/hr	US\$22,000 + US 1.000 por instalación
Wind Machines (Amarillo Wind Machines LLC)	5 hectáreas	Dos modelos: gas y propano diesel	63 lt/hr (gas propano)	US\$33,000 + US 2.000 por instalación
Hélices (Tow and Bow Limited)	6 hectáreas	Gasolina sin plomo	5 lt/hr	US\$33.000 sin costo de instalación
SISfrost Protection	4 hectáreas (Modelo SIS M15)	Gas, electricidad, diesel y mediante motores de tractor	3,7 lt/hr (gas)	US\$26.000 Costo de instalación con estudio técnico previo
Frostboss (New Zealand Fronst Fans)	6 hectáreas	Diesel	19 lt/hr	US\$ 26.000 + costo de instalación
Chinook Wind Machines (H.F. Hauff Co. Inc)	6,5 hectáreas	Diesel	26 lt/hr	US\$ 26.000 + costo de instalación

Equipo	Área que cubre	Tipo de Combustible	Consumo de combustible	Precio
Frostguard (Agrofrost)	1 hectárea	Gas propano	13-15 kg/hr	US\$ 6.600/hectárea
Frostguard (Agrofrost)	6 hectáreas	Gas propano	40 kg/hr	US\$ 2.250/hectárea
Lazo FCM	10 hectáreas	GLP	30-35 kg/hr	US\$ 1.000/hectárea
Heat Ranger	20 hectáreas	GLP	210 kg/hr	s/i
Zimex	0,01 hectárea	Diesel	s/i	US\$ 5.000/hectárea

Se debe considerar que, al menos en Chile, estos equipos no cuentan con evaluaciones que demuestren la efectividad que describen sus fabricantes en las especificaciones técnicas. En general, los proveedores no aportan información debidamente respaldada por alguna institución independiente, que demuestre el efecto protector real de estos artefactos, lo cual debe ser tomado en consideración a la hora de evaluar la implementación de alguno de estos equipos.

Debido al objetivo de la investigación, se presentan las tecnologías utilizadas para el control de heladas radiativas, centradas en los mecanismos, estructuras, aplicabilidad de las máquinas convencionales de viento, decantación por selección inversa SIS y soplado vertical aéreo, se incluyen las máquinas de viento portátiles como solución a diversos problemas. Éstas tecnologías tienen distintos mecanismos de automatización, estrategias de control, aplicabilidad y parámetros que condicionan su funcionamiento. También se exponen las tecnologías utilizadas para la calefacción, como lo son las estufas y quemadores, entre otros. Además, se muestran los principales trabajos que se han escrito al respecto, el Cuadro 3.3 3.1.3 muestra el trabajo representativo en la protección de heladas utilizando perturbación de viento.

Cuadro 3.3: Trabajo representativo en la protección de heladas utilizando perturbación de viento.[25]

Author/Organization	Year	System*	Objective of the work
Crawford	1964	CWM	Heating requirements of wind machine for effective frost protection.
Bates	1972	CWM	Reliability assessment of temperature inversions and modifications produced by a wind machine.
Davis	1977	CWM	Evaluation of the effectiveness of a wind machine under different temperature inversions and to indicate the effective areas of application.
Bates and Lombard	1978	CWM	Determine the existence of inversions and beneficial effects of wind machines to offer frost protection to orchards.
Doesken	1989	CWM	Assessment of wind machines to protect high elevation fruits from freeze damage.
Ribeiro et al.	2006	CWM	Effects of starting fans before reaching plant's critical temperature.
Tow and Bow Limited	2012	CWM	Portable frost protection under a variety of freezing environments.
Yazdanpanah and Stigter	2011	SIS	Investigate the influence of SIS systems using both phenological and meteorological data.
Battany	2012	SIS	Comparing performance of SIS with CWM on temperature changes under similar radiation frost conditions.
Hu et al.	2015a	SIS	Frost protection effectiveness of vertical blowing fans (VBFs) in a steeped slope vineyard and in rippling topography tea plantation.
Miller et al.	1971	H	Effectiveness of helicopter for frost protection.
Miles and Hinz	1976	H	Evaluating the ability of helicopters to increase plant canopy air temperature.
Hu et al.	2015b	H	Determining the best flight parameter combination for optimal frost protection effect.

Note: * Conventional wind machine (CWM); Selective Inverted Sink (SIS), and Helicopters (H).

3.1.1. Ventilación forzada horizontal

Las máquinas de viento ubicadas en Viveros de Copequen se encuentran dentro de esta categoría. Están compuestas por una hélice montada sobre un eje vertical, con un ángulo de depresión. Las máquinas de viento brindan protección al aumentar la densidad de flujo de calor sensible hacia abajo durante una helada radiativa. Operan arrastrando aire frío y húmedo pesado cerca del suelo y permiten que sea remplazado por el aire de la capa de inversión más cálida para evitar la estratificación. Su función principal es eliminar la estratificación del aire aumentando la temperatura a través de la mezcla de aire producida, generada fricción entre el follaje del cultivo y el aire inyectado. [25]

Dependiendo de la disposición en la operación para la protección contra heladas puede ser fija y móvil, mostradas en las Figuras 3.1(a) y 3.1(b), respectivamente.

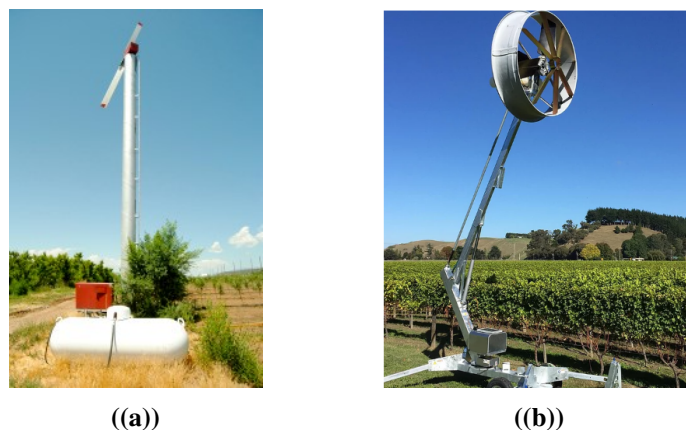


Figura 3.1: Máquina de viento fija (a) [2], Máquina de viento portátil (b) [62]

Existen diversas marcas en la producción de este tipo de máquinas como Orchard Rite (EE. UU), Amarillo Wind Machines (EE. UU), Tow and Blow Limited (NZ), New Zealand Frost Fans (NZ) y H.F. Hauff Company Inc (EE. UU) [15], las que ofrecen variedad en cuanto a cantidad de aspas. Portabilidad, tipo de combustible: Gas-Diesel, precio de equipos (14 a 20 millones CLP), nivel de ruido, entre otros.

Cada modelo de máquina de viento, presenta diversas indicaciones operacionales, tal como el radio de cobertura (120 – 150 [m]), hectáreas protegidas (5 – 7,4 [ha]), consumo de combustible (6 – 63 [lt/hr]), entre otras. Dichas características son presentadas de forma general por los fabricantes, es decir, no detallan las condiciones bajo las que fueron cuantificadas, por ejemplo, el tipo de cultivo, zona geográfica, disposición de los equipos, las cuales sí condicionan el funcionamiento real y variable de las máquinas.

3.1.2. Ventilación Vertical

El sumidero selectivo inverso SIS utiliza un ventilador de bajo número específico de revoluciones, con un eje vertical y una hélice horizontal dispuesta en ángulos de entre 15 a 50 grados, que busca romper la inversión térmica, para la protección contra heladas. El flujo se produce en la base de las máquinas, permitiendo que el aire frío sea expulsado, creando un efecto de succión que permite inyectar aire cálido hacia sectores cercanos a la superficie. La extracción de aire frío depende de la distancia entre el borde inferior del ducto y la superficie del suelo, y las aspas permitirán dar dirección al aire, contribuyendo al mezclado eficaz de fluido en la capa de inversión [25]. Las Figuras 3.2(a) y 3.2(b) muestran un diagrama del funcionamiento del sistema SIS.

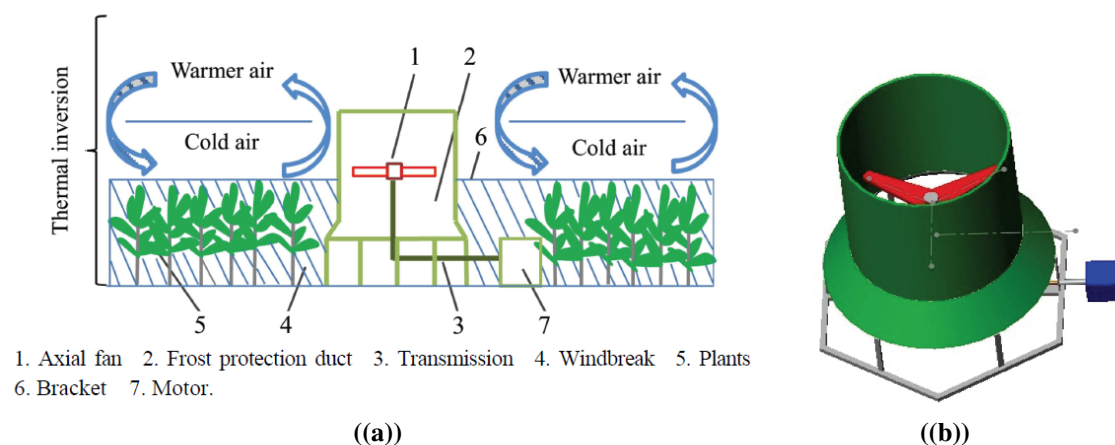


Figura 3.2: Diagramas de funcionamiento del sistema SIS. [25]

Diversos estudios se han realizado con el fin de probar o desacreditar la efectividad del sumidero selectivo inverso. Yazdanpanah [64], midió la temperatura en el dosel de la planta y el área protegida por el SIS en un huerto de almendros. El análisis fonológico mostró que el daño por heladas mínimo se encontraba cerca del sistema SIS, con un gradiente decreciente de daño por heladas en función de la distancia desde el SIS. Más aún, los resultados mostraron que el daño del brote en la zona afectada era, en promedio, 20 % menor que en el control. Concluyeron que la efectividad de la reducción de daños por heladas utilizando sistemas SIS no era alentadora. Por lo tanto, la deficiencia no lo hace mejor opción para control de heladas. Sin embargo, sugirieron una combinación de SIS con otros sistemas, como calefacción, que puedan aumentar su efectividad.

Con el fin de evaluar la efectividad de SIS y las máquinas de viento convencionales, Battany [21] comparó el cambio de temperatura producto de la operación de dos máquinas SIS y una máquina de viento en condiciones similares. Aunque ambos equipos cumplieron con el objetivo de proteger, la máquina de viento convencional logró un aumento de temperatura consistentemente más grande y significativo a lo largo de un área más amplia en comparación con las dos máquinas SIS, incluso en combinación con drenaje de aire cortavientos. Además, los aumentos de temperatura observadas con los sistemas SIS fueron muy limitadas y probablemente de poco beneficio para la protección contra heladas de viñedos incluso bajo fuertes condiciones de inversión térmica. Luego, Battany indica que los resultados pueden ser específicos del sitio y recomienda una evaluación adicional de los sistemas SIS en un espectro más amplio de condiciones.

En un reciente estudio, Hu [25] evaluó el rendimiento de los ventiladores de soplado

vertical (Vertical Blowing Fans, VBF) para protección contra heladas en un viñedo de pendiente pronunciada y en colinas de plantaciones de té. El estudio no mostró beneficios en la temperatura en el viñedo. Sin embargo, la prueba en la plantación de té mostró un aumento de temperatura en la etapa inicial de operación del VBF, pero ese beneficio se perdió con el tiempo. Los autores sugirieron los resultados pueden verse influenciados por el tamaño de la máquina y el entorno de la plantación y, por lo tanto, el resultado no pudo validar la efectividad del VBF. La mayoría de los estudios muestran que SIS no es una opción confiable y se recomienda ejecutar junto con calefactores para logra una protección contra heladas más efectiva.

3.1.3. Ventilación vertical aérea

Se refiere al proceso de ventilación por medio de helicópteros no tripulados, estos son utilizados para empujar el aire cálido hacia el cultivo, reemplazando la capa de aire frío asentada cercana a la superficie. Los helicópteros sobrevuelan la capa de inversión térmica entre los 20 a 30 metros de altura, con una velocidad de 8 a 40 [km/hr] accionando rotores que empujan el aire cálido hacia abajo, incrementando la temperatura del aire entre el cultivo y, por lo tanto, reduciendo el daño por heladas [25]. Este método funciona óptimamente para fenómenos de heladas radiativas que ocurren en noches despejadas, con poco o nada de viento. Sin embargo, no es recomendado cuando la temperatura mínima es inferior a -5 [°C], cuando la velocidad del viento es cercana a 2,5 [m/s] ni tampoco para heladas advectivas. [60] La Figura 3.3 muestra el principio de trabajo de la ventilación vertical aérea.

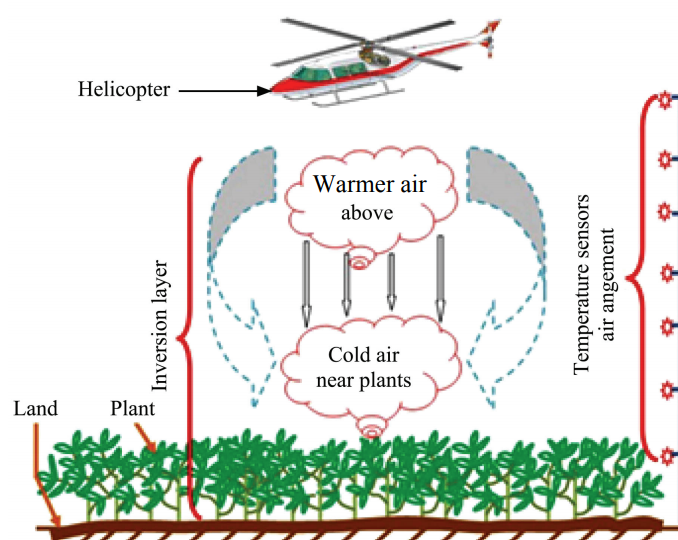


Figura 3.3: Principio de trabajo de la ventilación vertical aérea. [25]

3.1.4. Calefacción

Los calefactores y/o quemadores son equipos que emiten calor originado por combustión, para reemplazar las pérdidas de energía desde la superficie, evitando así la acumulación de aire frío en los primeros metros desde el suelo [60]. Este sistema fue diseñado para funcionar de forma sencilla, sin embargo, se ha demostrado que es poco eficiente pues gran parte de la energía que produce se pierde al ser liberada hacia las capas superiores del aire, por lo tanto, su punto crítico de uso tiene que ver con el diseño y manejo apropiado. Este sistema tiene la capacidad de aumentar en $1[^\circ\text{C}]$ la temperatura media del aire en el cultivo, entre el suelo y hasta tres metros de altura.

Se identificaron a Agrofrost, Heat Ranger, Lazo FCM y Zimex como proveedores comerciales de los equipos, teniendo las dos últimas participaciones activas en la industria agrícola nacional. La Figura 3.4 resume la oferta de las empresas identificadas y el equipo que ofrecen en la actualidad.

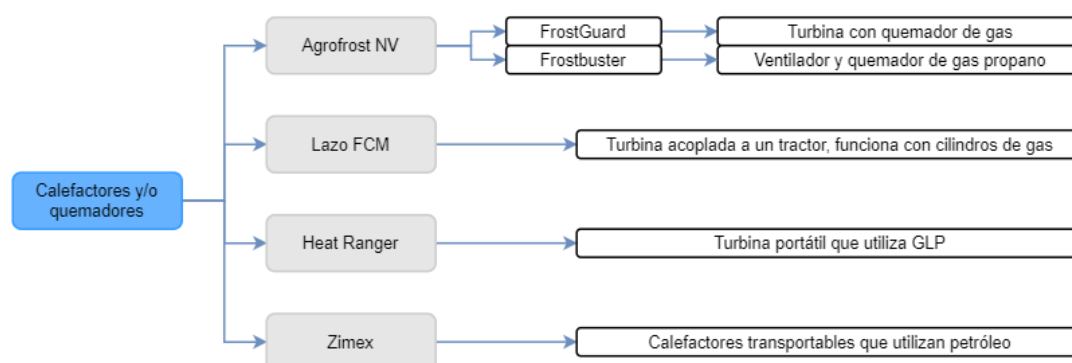


Figura 3.4: Empresas destacadas y oferta de calefactores y/o quemadores para el control de heladas. [60]

3.2. Operación y control

3.2.1. Parámetros operacionales y de funcionamiento

A continuación, se presentan parámetros que determinan el desempeño de funcionamiento y operacional de las máquinas de viento. Se contemplan tanto aquellos establecidos por el fabricante, así como otros relacionados con las características propias del ambiente en el cual es necesaria la instalación de estas máquinas.

- Densidad del aire: Entre mayor sea la densidad del aire, mayor será el peso del aire frío, que empuja hacia abajo el aire. Este quedará bajo la altura del área de influencia de la máquina de viento, reduciendo el área de protección.
- Flotabilidad del aire: puede causar un rápido ascenso de las masas de aire, evitando que estas penetren en el cultivo, disminuyendo la efectividad de las máquinas.
- Inversión térmica: condiciona la protección proporcionada por las máquinas de ventilación, que depende de la fuerza de inversión térmica. La inversión térmica ocurre con vientos de velocidades inferiores a 1,94[m/s] y se dispersa en presencia de velocidades mayores a esa [21]. Además, es necesaria una inversión de entre 1,5 a 2 [°C] para un funcionamiento efectivo de las máquinas [21], así el aumento de temperatura producto del accionamiento de las máquinas de viento se acerca al promedio de la inversión [25].
- La fuerza de inversión se puede clasificar en: débil (0,5 a 1,1 [°C]), moderada (1,6 a 3,3 [°C]) y fuerte ($\geq 3,3$ [°C]), la que varía temporal y espacialmente (en dirección vertical) durante la noche.
- Dirección del viento: la velocidad ayudará al control de heladas si es que si dirección coincide con la del viento generado por la hélice [63]. Si la velocidad del viento es perpendicular u opuesta al viento generado por la hélice, disminuirá el área de cobertura.
- Topografía: Si la pendiente del terreno y el viento natural del lugar se encuentran en la misma dirección, el área de influencia de una máquina de viento será elíptica, en cambio, si su disposición es en direcciones diferentes (incluso perpendiculares), se distorsiona la forma del área de influencia. [21]
- Ángulo de depresión: generalmente, este ángulo varía entre los 6 a 9 ° en máquinas de viento convencionales. Mientras mayor sea el ángulo, menor será el área influenciada, el área justo debajo de la máquina de viento es protegida en menor medida que el resto e incluso puede llegar a estar desprotegida. Es por esto que es necesaria una correcta disposición de los aparatos, que permita a los ventiladores cubrir efectivamente todo el cultivo expuesto. [25]
- Movimiento giratorio de la ráfaga: se recomienda que la ráfaga de aire tenga un movimiento entre 60 y 180°, con un periodo de giro entre 2 a 5 minutos, para que el aire no vuelva a re-estratificarse [25]. El ángulo óptimo es de 108°, justo al límite

de la capa de inversión, a pesar de que las máquinas comercializadas tienen ángulos de giro de hasta 360°. Mientras menor sea el ángulo de cobertura, menor será el tiempo de giro necesario para lograr la estratificación del aire [21]. La velocidad de la ráfaga de viento dependerá a su vez de: el diseño del ventilador, la velocidad de operación [rpm], la potencia del motor y las condiciones ambientales [9].

- Disposición de los equipos: dependiendo de la distribución de las máquinas de viento y el distanciamiento de éstas con el cultivo influenciará en su efectividad. La interacción del flujo de aire con los propios equipos, cultivos u otros objetos determinará el recorrido del aire de la ráfaga.
- Altura de la torre: la torre debe tener una altura que le permita alcanzar la capa de inversión térmica, para así lograr penetrar aire cálido a los cultivos. Mientras mayor sea la altura de la torre, mayor será el alcance de la ráfaga de viento, evitando que roce con el cultivo y aumentando el alcance total de la máquina [9].

3.2.2. Control

Las características meteorológicas determinan las condiciones de inversión térmica y el alcance de temperatura que permita la protección del cultivo contra las heladas. Debido a esta influencia, y el comportamiento transiente de los factores meteorológicos, se recomienda un sistema de control automático para las máquinas de viento, que responda a las variaciones de la naturaleza.

En su libro “Protección contra Heladas: fundamentos, prácticas y economía”, Snyder [51] recomienda que el encendido de las máquinas responda a una velocidad de viento inferior a 2,4 [m/s] en condiciones térmicas menores a 0[°C], para huertos y viñedos en Europa y América. Otros estudios recomiendan encendidos para temperaturas menores a 3 [°C], en las plantaciones de té en Japón [26]. Además, Yongguang [26] plantea que la solución a los defectos en el control de encendido/apagado de las máquinas de viento se basa en dos factores: la temperatura crítica del cultivo y la inversión térmica existente. A su vez, propone involucrar ambos factores utilizando sensores de temperatura ubicados en la parte superior e inferior de la capa de inversión térmica, información que será transmitida a un controlador que verifique la diferencia de temperatura respecto al valor crítico, si el delta de temperatura se ubica dicho valor, se accionará la máquina de viento.

Si bien no se fija un valor de tiempo de funcionamiento que permita estabilizar la

temperatura, lo que genera un encendido y apagado constante del equipo, elevando el consumo de combustible del motor. Fraser [21], obtiene un tiempo de 10 y 15 [min] para la estabilización del incremento de la temperatura en eventos de heladas ocurridos en invierno/otoño y primavera, respectivamente.

Existen diversos sistemas dedicados a medir variables meteorológicas y relacionarlas con un sistema de prevención de heladas, con el fin de controlar el funcionamiento adecuado de las máquinas de viento. El Cuadro 3.4 muestra algunos de ellos:

Cuadro 3.4: Comparativa de características técnicas para sistemas de monitoreo.[60]

Sistema	Alcance	Variables que mide	N° de sensores	Rango de medición (T°)	Sistemas complementarios
Watchdog (Spectrum Technologies inc.)	s/i	T° del aire, Humedad relativa, Velocidad y dirección del viento, Lluvia y Radiación solar	9	-30°C/55°C	Transmisión a teléfono móvil
Agronet (Bissen)	s/i	Temperatura, Humedad relativa, Velocidad y dirección del viento, Radiación, Pluviometría, presión atmosférica	6	s/i	Transmisión a teléfono móvil, tablet, computador. Plataforma en línea
Harvest Online Horticultural Monitoring and Control Systems (harvest Electronic Design)	2 km	Velocidad y dirección del viento, Precipitación, Humedad relativa, Presión barométrica, Radiación solar, Evo transpiración, Humedad de la hoja	+7	-55°C/125°C	Datos on-line
TempGard (IAS Systems)	s/i	Temperatura, Humedad relativa, Humedad del suelo, Humedad de la hoja, Precipitaciones, otros	+5	Hasta 65°C	Batería solar

3.3. Modelación numérica

Conocer el comportamiento del flujo de viento durante la ocurrencia de una helada es de vital importancia, no sólo para conocer las distribuciones de temperatura que se presentarán, sino también para tener una base sólida al momento de decidir dónde y cómo instalar las máquinas de viento, todo esto con el fin de proteger a los cultivos de daños por enfriamiento y/o congelación. Actualmente, una de las herramientas más potentes para poder describir el comportamiento de un flujo es la modelación numérica.

Al momento de modelar una helada, son diversos los factores que se deben tener en consideración: se debe simular un flujo en régimen turbulento de baja intensidad turbulenta, pues en la naturaleza generalmente existe un proceso de relaminarización del aire, debido a que durante las heladas el aire se vuelve muy pesado, por las bajas temperaturas. Además, hay que tener en consideración la posible inversión térmica, característica de las heladas.

A continuación, nos enfocaremos en la interacción del cultivo con el flujo de viento, fenómeno que es ampliamente estudiado en la actualidad. En 1992, Shaw y Schuamann[50], realizaron LES sobre un cultivo forestal, simularon un bosque de

20[m] de altura en condiciones neutrales y débilmente inestables utilizando una malla relativamente fina en un dominio muy limitado, extendiéndose sólo hasta tres veces la altura del cultivo sobre el suelo. Más tarde Shaw y Patton [48], intentaron refinar el modelo, tomando en cuenta también la fricción ejercida por los elementos del cultivo, también incluyeron una ecuación de transporte pasivo para wake scale turbulence, que no influyó en gran medida en las simulaciones.

El efecto del perfil vertical de densidad de follaje en bosques homogéneos ha sido estudiado por Dupont y Brunet [20] y Huang et al. [27]. En 1996, Raupach et al. [46] estableció una analogía ampliamente aceptada, propuso que los flujos sobre los cultivos se comportan de manera similar a una capa de mezcla plana en la parte superior del cultivo. Esta teoría es válida sólo para cultivos suficientemente densos, como indican, por ejemplo, Novak et al. [44] y Dupont y Brunet [20]. Se ha demostrado que los cultivos dispersos se comportan de manera similar a una capa límite turbulenta de pared rugosa, Huang et al. [27] investigaron la transición entre los dos regímenes aumentando gradualmente la densidad vertical del follaje en sus simulaciones. Los cultivos organizados en filas fueron recientemente estudiados en asociación con un flujo a través de un viñedo, ([8], [12]).

3.3.1. Estudio LES de flujos térmicamente estratificados sobre cultivos

Según Nebenführ y Davidson [43], despreciando los efectos de la flexibilidad de los árboles y los elementos individuales del cultivo, es posible describir un cultivo forestal en términos de la densidad del follaje, en este caso, el cultivo queda simplemente representado por la fuerza de arrastre ejercida por los árboles sobre el flujo de aire. Donde las fuerzas de arrastre y de Coriolis son, respectivamente:

$$F_{f,i} = -C_D \alpha_f U \bar{u}_i \quad (3.3.1)$$

$$F_{c,i} = 2\Omega \sin \phi (\bar{u}_f - u_{j,g}) \epsilon_{ij} \quad (3.3.2)$$

Durante el estudio, se despreció el efecto del calor transferido por radiación desde el bosque hacia el ambiente, pues se asume que la transferencia de calor entre hojas y ambiente es por conducción. Considerando una altura promedio del bosque de $H=20[m]$, utilizando un dominio computacional de $(x_{max}, y_{max}, z_{max}) = (80H, 40H, 20H)$ y una malla de $(n_x, n_y, n_z) = (192, 96, 48)$. Considerando la distribución de densidad de

follaje en el eje z.

Se desarrollaron un número de LES para un flujo sobre un bosque horizontalmente homogéneo. Se reprodujeron numéricamente seis clases diferentes de estabilidad térmica, identificadas de mediciones en terreno, que van desde condiciones estables hasta muy inestables. Por primera vez, también fue considerada la estratificación estable en flujos en cultivos. Las simulaciones se validaron con mediciones recientes en un bosque de pinos, en el sur-este de Suecia. Se evidenció concordancia entre las simulaciones y mediciones de velocidad de viento, en todos los casos exceptuando el muy estable.

El modelo SGS de ecuación k falló para el caso muy estable, donde aparecieron oscilaciones numéricas en la región laminar sobre la capa límite superficial, como consecuencia del desvanecimiento de la turbulencia viscosa. Nebenführ y Davidson recomiendan usar modelos SGS más apropiados para capa límite estables, SGS escala-dependiente, prometedor para flujos estables estratificados ([31], [53]).

Específicamente para flujos estables, se obtuvo una disminución de la profundidad de penetración de momentum al interior del bosque. Además, la generación de esfuerzo cortante aumenta mientras mayor sea la estabilidad, simplemente como consecuencia del arrastre del viento. No se vio influencia clara de la estabilidad en el transporte de turbulencia, mientras que el transporte de presión fue más influenciado por la estratificación térmica. Mientras más estable sea el flujo, el transporte de presión juega un rol importante, entregándole energía cinética turbulenta a la región del cultivo.

3.3.2. Rugosidad aerodinámica de cultivos

La Organización de Comida y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), define la resistencia aerodinámica a la transferencia de calor y vapor de agua sobre una superficie evaporante hacia el aire sobre un cultivo [7], como:

$$r_a = \frac{\ln \frac{z_m - d}{z_{om}} \ln \frac{z_h - d}{z_{oh}}}{k^2 u_z} \quad (3.3.3)$$

Donde:

- r_a resistencia aerodinámica [s m^{-1}]
- z_m altura de las mediciones del viento [m]

- z_m altura de las mediciones de la humedad [m]
- d altura del plano de nulo desplazamiento [m]
- z_{om} largo de rugosidad que gobierna la transferencia de momentum [m]
- z_{oh} largo de rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua [m]
- k constante de Von Karman, 0.41 [—]
- u_z rapidez del viento a la altura z [ms^{-1}]

Para poder hacer esta aproximación lo más precisa posible, diversos investigadores han propuesto distintos métodos para calcular el largo rugosidad aerodinámica. En su estudio, Zilitinkevich [65] muestra el efecto de la estratificación en el largo de rugosidad aerodinámica y la altura de desplazamiento. Para situaciones hidrostáticamente estables, los elementos rugosos se sumergen dentro de la capa de viscosidad turbulenta (similar a la profundidad de la capa de viscosidad molecular), por lo que no afecta al flujo.

Por otro lado, Lu et. al [35] estudiaron las características y parametrización del largo de rugosidad aerodinámica para superficies heterogéneas, demostrando su dependencia con la altura de vegetación, llegando a una relación logarítmica entre ambas. Probando que el largo de rugosidad aerodinámica no debe ser calculado como el promedio de los largos de los componentes que componen un "parche" de superficie.

Cabe mencionar que todos los estudios previos se basan en el trabajo de Abteu [6], quien desarrolló ecuaciones para estimar el largo de rugosidad aerodinámica para diferentes de arreglos de vegetación.

Capítulo 4

Marco Teórico

4.1. El Cerezo

El cerezo (*Prunus Avium*) es un árbol frutal que forma parte del género *Prunus* y pertenece a la familia de las rosáceas. Es una especie de hoja casuca arcórea, de climas templado y subtropical.

4.1.1. Morfología

El cerezo es un árbol caducifloro que puede llegar a los 25[m] de altura, con la corteza lisa, anillada, de color marrón rojizo, que se desprende de anchas bandas transversales. Presenta problemas de consucción, debido a que ramifica muy poco, esto también afecta en los tratamientos fitosanitarios, la recolección y cualquier técnica que requiera el acceso a la planta.

Sus hojas son simples, ovado-oblongas, acuminadas, de 7.5 a 12.5 [cm] de longitus y 3.5 a 5[cm] de altura, fasciculadas en el extremo de corta ramillas, tienen margen irregularmente aserrado. Pecícolo de 4-5[cm] de longitus, con 2-3 glándulas rojizas cerca del limbo. Al caer las hojas adquieren una tonalidad rojizo-anaranjada muy decorativa.

Las flores son blancas de 2 a 3 [cm] de diámetro que aparecen antes o al tiempo que las hojas. Tienen 5 sépalos, 5 pétalos blancos, obovados, numerosos estambres y pistilo lampiño; se agrupan en hacecillos sentados, a la manera de umbelas, en número de 2-6, rodeados en la base por una corona de brácteas y llevan cabillos muy largos, que miden entre 2 a 5 [cm]. Los frutos son drupa de color rojo negruzco, globosas o con figura de corazón. El hueso interior es globoso, casi liso.

Sus órganos fructíferos son ramos mixtos, chifonas (son como ramos mixtos de menor vigor) y, sobre todo, ramilletes que presentan varias yemas florales y una vegetativa, por lo que la poda debe encaminarse hacia su producción.

El cerezo es una especie donde se produce fuerte incompatibilidad polen-pistilo. Normalmente se plantan polinizadores cada tres árboles en una de cada tres filas, y se planta más de un cultivar de polinizador para garantizar el solape de la floración. Los cerezos son polinizados por abejas.

Por ser el cerezo un carozo, su curva de crecimiento es diferente a otras especies como el naranjo o la vid. Para *Prunus Avium*, dicha curva corresponde a una doble sigmoidea, encontrándose dividida en tres etapas. La curva de crecimiento del cerezo se muestra en la Figura 4.1, indicando sus distintas etapas de crecimiento:

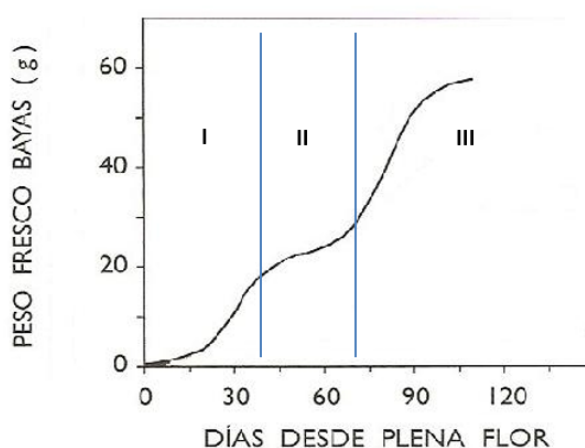


Figura 4.1: Curva de crecimiento del fruto de cerezo [4]

Etapa 1: Comprende desde floración hasta el inicio del endurecimiento del carozo. Bajo aumento de tamaño, debido a que principalmente se observa una alta tasa de división Celular.

Etapa 2: El fruto casi no aumenta su tamaño, se produce el endurecimiento del carozo y desarrollo del embrión, período característico de cada variedad, siendo más reducido en variedades tempranas que aquellas variedades más tardías.

Etapa 3: Comprende desde la finalización del endurecimiento del carozo hasta

cosecha. El fruto crece rápidamente mediante la elongación de las células formadas en la Etapa 1. [4]

Estados fenológicos

En el cerezo se distinguen diez fases fenológicas desde la latencia o reposo invernal hasta la cuaja. Estas fases se indican con una letra del alfabeto, son las siguientes y se muestran en la Figura 4.2:

- a) Estado de reposo pleno; las yemas presentan un color café, con pérulas aserradas y puntas agudas.
- b) Estado de yemas hinchadas; estas se redondean, las pérulas se alargan con una coloración clara en los márgenes, también el ápice de la yema presenta un color claro.
- c) Estado de botones verdes; yemas abiertas, con botones florales apenas visibles y aún muy cerrados entre ellos.
- d) Estado de esbozos florales evidentes; yema, abierta, los botones florales comienzan a separarse.
- e) Estado de botones florales libres; estos comienzan a abrirse.
- f) Estado de floración.
- g) Estado de caída de pétalos.
- h) Estado de cuaja.
- i) Estado de caída del cáliz.
- j) Estado de fruto joven en crecimiento.

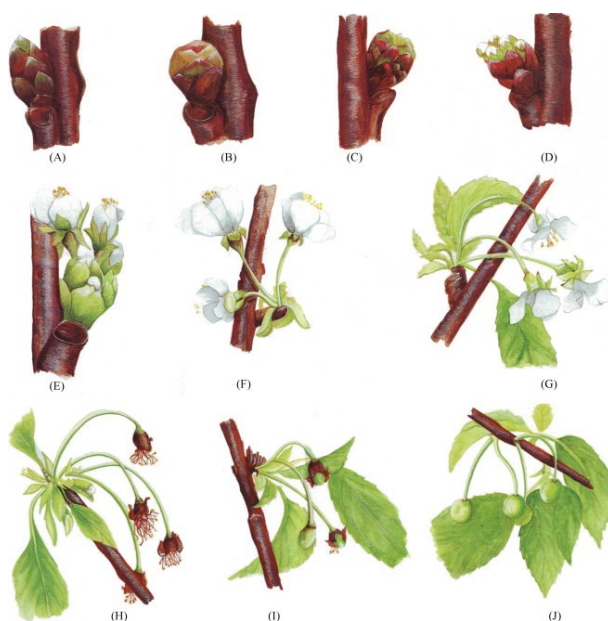


Figura 4.2: Estados fenológicos del cerezo.[3]

Los estados desde c) a e) generalmente tienen una duración breve. En condiciones climáticas con días calurosos y sin lluvia, la floración de un árbol dura (en promedio) entre 7-10 días. Sin embargo, bajo condiciones de clima adverso la duración puede ser más del doble de lo normal. Esta última situación, ocurre normalmente bajo las particulares condiciones climáticas del sur de Chile. [17]

Requerimientos edafoclimáticos

Temperatura El cerezo tiene una gran capacidad de adaptación a distintas áreas edafoclimáticas de la zona templada. Es una especie resistente al frío, sin embargo, sensible a las heladas durante el periodo de floración (aproximadamente en septiembre), en zonas de la pre-cordillera y zona sur de Chile. La sensibilidad, varía según la especie, llegando a resistir hasta -4 [°C], siendo el fruto el órgano más afectado por este fenómeno físico. En zonas de bajas temperaturas, el trabajo de las abejas se ve perjudicado, puesto a que estas trabajan entre los 14 y 15 [°C]. En términos de frío invernal, se requiere de acumular entre 400 y 1500 Horas frío, siendo el rango ideal entre $3,2$ y $3,7$ [°C]. Este es un dato crítico para la elección de la variedad a sembrar, producto de que los climas en Chile varían mucho dependiendo de la zona, y especies con bajo requerimiento de horas frío se acumularían muy bien a regiones poco frías.

Precipitaciones Cuando las precipitaciones toman valores próximos a 1.200 [mm/año] es posible su cultivo sin llevar a cabo riegos, aunque el empleo de distintos patrones modifica los requerimientos hídricos, pudiendo cultivarse tanto en secano como en regadío. También hay que tener en cuenta los factores climáticos que afectan a las abejas para que se lleve a cabo una correcta polinización.

Cuando las precipitaciones son excesivas durante la maduración del fruto puede producirse su agrietado: el agua se mueve a través de las células epidérmicas y entran en el mesocarpo por ósmosis. Las células del mesocarpo aumentan rápidamente de volumen, provocando que la epidermis se estire, una vez que llegan a su límite de elasticidad se raja. El cultivar Lambert es el más resistente al agrietado. Las pulverizaciones de calcio solubles, orgánicas e inorgánicas, tiende a reducir el agrietado. El empleo de máquinas removedoras de aire (como las utilizadas para controlar las heladas) para eliminar el agua de la cavidad pedicelar de las frutas ha ayudado también a solucionar este problema.

Humedad Si la humedad es abundante, ésta produce niebla y cuando tiene poco

contenido de humedad, se forma la helada. Por ello una gran humedad atmosférica reduce la probabilidad de ocurrencia de heladas. Parte de la humedad presente en la atmósfera es la producida por la evapotranspiración de las plantas y no se puede perder de vista el impacto que ésta tiene, el suelo actúa como una esponja, que se irá “secando” a medida que reciba radiación solar.

Cabe destacar que el vapor de agua funciona como un escalón activo en el campo de flujo, es decir, cambia la dinámica del flujo. El vapor de agua absorbe más radiación visible y cercana al infrarrojo que cualquier otro componente constitutivo de la atmósfera. Producto de la absorción de radiación solar por parte del vapor de agua se observa un calentamiento diabático de la atmósfera y una consecuente reducción del flujo radiativo que llega a la superficie, calentando el aire en mayor medida.

Viento Los daños producto del viento se pueden observar en aspectos como daños en copas, rompiendo injertos tiernos y deshidratando yemas entre otros, por lo que se debe tener en cuenta lo siguiente por si se desea llevar a cabo la plantación en faldas de cerro, una solución a este problema sería ubicar en los deslindes del predio árboles que actúen como cortinas y que a la vez puedan cobijar especies polinizadoras y aves, que a la vez pueden controlar plagas.

Suelo Son preferibles los suelos con buen drenaje, ligeramente calizos, exposiciones con buena iluminación y aireación, laderas suaves de montaña y secanos frescos. Entre los factores edafológicos limitantes se encuentra la abundancia de suelos pesados y calizos con pH elevado, que ocasionan problemas de clorosis y asfixia radicular. Requiere de profundidades de 60 a 80 centímetros.

4.1.2. Especies

Las especies de cerezas que se encuentran en el sitio son dos, Santina y Skeena. Ambas especies tienen su origen en Agricultural Research Station, Summerland, Canadá y se describen a continuación.

Santina es una cereza temprana, de tamaño mayor al promedio, rojo oscuro, madura unos 15 días antes que Van. Es firme y la piel es muy atractiva y brillante. Es de forma oval, con un pedicelo medio largo. El sabor es moderadamente dulce para una cereza temprana. El árbol es autofértil pero nunca se sobrecarga. Si la fruta es cosechada

temprano, con la piel roja, el tamaño es pequeño. Es moderadamente resistente a la partidura.

Skeena es una variedad de media estación, autofértil y de muy buen sabor. En comparación con Lapins, los frutos de Skeena son un poco más grandes y más firmes, con pudúnculos más gruesos, el árbol es mucho más fácil de manejar y la floración es más tardía que otras variedades autofértiles. Esta variedad está ganando popularidad en Canadá y en el mundo.

La Figura 4.3 muestra los periodos de floración y cosecha para ambas especies:

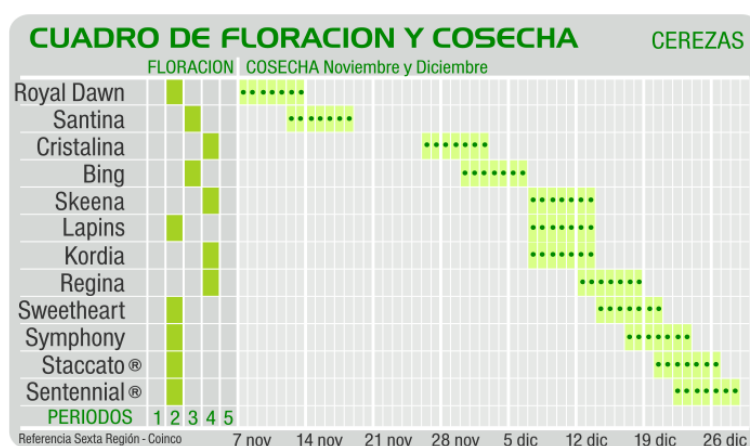


Figura 4.3: Cuadro de floración y cosecha. [5]

4.2. La helada como fenómeno atmosférico

Meteorológicamente, se define la helada como el evento responsable de daños en los cultivos por congelación o permanencia de bajas temperaturas por períodos de tiempo determinados, específicamente, a temperaturas bajo cero grados, donde el aire más frío se ubica en la zona más baja, por esta razón la temperatura de la superficie puede llegar a ser 2 a 3 grados menor que la registrada por una unidad meteorológica (ubicada a 1,5 [m] de altura). Este evento se desencadena principalmente por el enfriamiento de la superficie, la pérdida de calor es del orden de 1000 [kW] por hectárea [47] y pueden estar o no acompañadas de rocío y escarcha, si fuere el caso, se conocen como heladas blancas que se asocian a una mayor humedad en el aire, de lo contrario, se presentan las heladas negras. Estas son más dañinas que las blancas, debido a la ausencia de la energía liberada por la condensación o congelación del vapor de agua que permite contrarrestar

el descenso de la temperatura asociadas a un ambiente seco.

El real efecto de las heladas en los cultivos es complejo de cuantificar, pues abarca distintas aristas que se presentan en más detalle en el Capítulo 1. En Chile, la presencia del mar modera la ocurrencia de las heladas invernales, pero debido a su compleja topografía, existe una variabilidad sobre su comportamiento incluso en puntos cercanos, por lo que no se puede generalizar su impacto en la agricultura.

4.2.1. Clasificación de las heladas

Según su origen:

- **Advectivas:** se producen por efecto de un frente frío a macro escala (generalmente bajo cero grados) proveniente del polo sur, que ingresan a la zona central del continente abarcando grandes extensiones con vientos turbulentos de velocidades superiores a 10 km/h. La variación de radiación solar y el comportamiento del viento son los principales factores que influyen a la temperatura, que se mantiene prácticamente constante desde la superficie hasta los 50 [m] de altura.
- **Radiativas:** son de carácter microclimático y se generan en condiciones de baja humedad, poco movimiento del aire, cielos despejados y temperaturas superiores a 0 durante el día y bajo esa cantidad por las noches. Esto hace que el flujo radiativo se pierda desde la superficie hacia la atmósfera producto del gradiente de temperatura entre ambas. Debido a la pérdida de calor de la superficie, las capas de aire más próximas se enfrían continuamente (pérdida de calor sensible), aumentando su densidad y formando una capa de inversión térmica que implica un ascenso de la temperatura con la altura (contrario a la distribución normal de temperatura). La altura de esta capa varía en un rango de 9 a 60 [m], dependiendo de la topografía local y las condiciones meteorológicas.
- **Mixtas:** se generan en condiciones de heladas advectivas en adición con días despejados, baja velocidad del aire y humedad lo que puede producir heladas radiativas, advectica-radiativa o radiativa seguida de una leve advectica. En el primer caso, los daños son mayores se producen a nivel del suelo y a grandes alturas, mientras que en los otros dos sólo a nivel del suelo.

Según fecha de ocurrencia: Las **primaverales o tardías** se caracterizan por ocurrir en noches claras sin nubes, baja humedad y viento escaso o inexistente, que repercuta

en la máxima pérdida de radiación desde la superficie. Afectan principalmente a los frutos anuales y los perennes frutales, que se encuentran con brotes recién emergidos y flores respectivamente. Por otra parte, las **Otoñales o tempranas** ven afectadas aquellas especies que se encuentren en floración o con frutos, interrumpiendo bruscamente su proceso de maduración y formación de yemas afectando la producción sucesiva. Las **invernales** son las más numerosas, pero no las más críticas, en vista de que generalmente las plantas se encuentran en reposo vegetativo, es decir, detienen su actividad de crecimiento según la especie, soportando mejor las bajas temperaturas.

4.2.2. Factores relevantes en la intensidad de una helada

Pueden ser analizados desde un punto de vista macro meteorológico y micro meteorológico. En el primer caso, los factores son el balance calórico de radiación y la circulación regional de la atmósfera, los que determinan la época de ocurrencia, la extensión geográfica y el tipo de helada. Por otra parte, los factores micro meteorológicos modifican puntualmente la circulación de aire en las zonas cercanas al suelo, estas son:

Nubosidad: la presencia de nubes permite moderar las variaciones de la temperatura, pues evitan las pérdidas de energía actuando como una barrera absorbiendo el calor proveniente de la superficie, aumentan su temperatura y reemiten hacia la superficie. La nubosidad es medida en octavos u octas: que corresponden a la octava parte de la bóveda celeste, donde el menor valor cero corresponde a un cielo totalmente despejado y uno totalmente cubierto con ocho. En el caso de las heladas, son características de octas entre cero y dos, imposibilitando la ocurrencia de heladas radiativas con valores de 7 y 8. [47]

1. (0/8): No hay nubes, cielo completamente despejado.
2. (1/8): Un octa o menos, escasas nubes.
3. (2/8): Dos octas de cielo cubierto.
4. (3/8): Tres octas de cielo cubierto.
5. (4/8): Cuatro octas de cielo cubierto.
6. (5/8): Cinco octas de cielo cubierto.
7. (6/8): Seis octas de cielo cubierto.
8. (7/8): Siete octas de cielo cubierto. Cielo casi cubierto, aunque no completamente.

9. (8/8): Ocho octas. Cielo cubierto completamente.

Velocidad del viento: produce la turbulencia encargada de homogeneizar las temperaturas de las masas cálidas superiores con las más frías e inferiores, disminuyendo el riesgo de la helada y evitando la acumulación de aire frío en sectores bajos. La velocidad característica de las heladas va entre 0 a 2[m/s], impidiendo la presencia de las heladas radiativas con velocidades superiores a 5[m/s]. [47]

Humedad del aire: el vapor de agua presente en el aire absorbe eficazmente la energía irradiada por la superficie y devuelve parte esta. El descenso de la temperatura en presencia de un ambiente húmedo puede desencadenar rocío o neblina e incluso hielo si se alcanza la saturación. En estos casos, la liberación de energía por el cambio de fase del vapor de agua permite contrarrestar el efecto de la disminución de la temperatura en la superficie.

Inclinación y exposición del terreno: debido a la mayor densidad del aire frío, este se desliza por las pendientes acumulándose en los lugares más bajos, fomentando la ocurrencia de heladas, siendo posible evitarlas en cultivos dispuestos en los sectores más altos del valle. La orientación de los cultivos influye con relación a la radiación a la que se expone. Así, aquellos orientados hacia el norte reciben mayor radiación solar y, por tanto, almacenan una mayor reserva de calor para disipar durante la noche.

4.3. Caracterización Termodinámica de la Atmósfera

Variables termodinámicas

El estado termodinámico del aire queda determinado por tres variables: densidad, temperatura y presión. La **densidad** es definida como la masa por unidad de volumen, debido a la compresibilidad del aire, esta puede variar si la velocidad del flujo es alta.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (4.3.1)$$

La **temperatura** cuantifica el movimiento de las moléculas:

$$T = \alpha M_w v^2 [\text{K}] \quad (4.3.2)$$

Donde: $\alpha = 410^{-5}[\text{Ks}^2/\text{m}^2]$ y M_w el peso molecular. La variación de la temperatura con la altura se obtiene para una atmósfera estándar: modelo idealizado de la estructura de la atmósfera seca y estable para obtener una aproximación de las condiciones promedio en función de la altura.

Se define el **potencial de temperatura** θ como la temperatura que tendría un volumen de aire al ser comprimido o expandido adiabáticamente a una presión de referencia P_0 , en general 100 kPa. ([55],[56]) Representa una variable conservable en un proceso adiabático, es decir, se mantiene constante.

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} \quad (4.3.3)$$

$$\theta(z) = T(z) + \Gamma_d * z \quad (4.3.4)$$

Donde:

- Γ_d corresponde a la tasa de decaimiento del proceso, que representa la variación de la temperatura con la altura. En un proceso adiabático seco el gradiente Γ_d es constante e igual a $-9,8[\text{K/km}]$ [55], el cual aplica al aire húmedo o seco, sin la presencia de un cambio de fase por parte del agua contenida, relacionando la variación de la temperatura con el desplazamiento vertical.
- $\frac{R_d}{C_p}$ Toma un valor de 0,286. ([55],[56]).
- P_0 corresponde a la presión de referencia, que en capa límite toma el valor a nivel de la superficie.

En procesos donde existe transferencia de calor de algún tipo, se deben considerar los efectos de la flotabilidad del vapor de agua o agua líquida presente en el aire. Así, las variaciones de temperatura virtual pueden considerarse en reemplazo de las variaciones. Para esto, se define el **Potencial de temperatura** θ_v :

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61\omega) = \theta(1 + 0,61\omega_s - r_L) \quad (4.3.5)$$

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{0,622P_v}{P - P_v} \quad (4.3.6)$$

$$r_L = \frac{m_L}{m_a} \quad (4.3.7)$$

$$P = P_a + P_v \quad (4.3.8)$$

Donde:

- La humedad específica ω , representa la cantidad de masa por vapor de agua m_v por unidad de masa de aire seco m_a .
- ω_s representa la cantidad de vapor de agua en el aire saturado a una presión y temperatura específica. [55]
- P_v y P_s representan la presión de vapor y de saturación de la humedad condensada en dichas condiciones.
- Tasa de relación de mezclado de agua líquida r_L , representa la masa de agua líquida por masa de aire seco.

También es posible relacionar la temperatura potencial con la humedad relativa, de la forma:

$$\theta_v = \theta \left(\frac{P - 0,6\phi P_s}{P - \phi P_s} \right) \quad (4.3.9)$$

Siendo que la humedad relativa ϕ la razón de cantidad de vapor de agua contenida en el aire con la máxima cantidad que puede contener, a la misma temperatura.

La **presión** es causada por el peso del aire a una altura determinada, por tanto, es mayor en el fondo de la atmósfera. Además, se considera isotrópica y monótona: ejerce el mismo empuje en todas las direcciones y su variación es sólo en una dirección. En la atmósfera, bajo los 105[km] decrece cuasi exponencialmente con la altura, disminuyendo más rápidamente cerca de la superficie. Sin embargo, en los primeros 3[km] de la atmósfera la presión tiene un comportamiento lineal con la altura, disminuyendo 10 [kPa/m].

Para relacionar las variables termodinámicas, se utiliza la **Ecuación de estado**:

$$P = \rho RT \quad (4.3.10)$$

Donde R es la constante del gas, para el aire seco corresponde a $R_d = 287,053[\text{J/Kkg}]$, permitiendo llamar a la ecuación anterior como **Ecuación de gas ideal**. El aire húmedo a una temperatura T , se comportará como aire seco a una temperatura virtual T_v :

$$P = \rho R_d T_v \quad (4.3.11)$$

Cuando las fuerzas de presión sobre y debajo de un volumen de aire son igualadas por la fuerza de gravedad, se dice que el aire logra un estado estacionario llamada **Equilibrio Hidrostático**. Si este se relaciona con la ley de gas ideal, se obtiene la variación de la presión con la altura para un perfil de temperatura arbitrario, representado en la **Ecuación hipsométrica**:

$$\frac{\delta P}{\delta z} = -\rho|g|[Pa/m] \quad (4.3.12)$$

$$z_2 - z_1 = \alpha \bar{T}_v \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (4.3.13)$$

$$\alpha = \frac{R_d}{|g|} = 29,3[m/K] \quad (4.3.14)$$

Donde $\bar{T}_v$ es el promedio de la temperatura virtual entre las alturas z_1 y z_2 .

Primera Ley de la Termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía haciendo un balance de esta en cualquiera de sus formas, principalmente calor y trabajo. Establece que el cambio de temperatura de una parcela de aire es generado por la adición de calor o por el trabajo realizado sobre o por esta, describiendo estados dinámicos y termodinámicos de la forma:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = -\frac{1}{\rho C_p} \left[\frac{\delta \zeta_x}{\delta x} + \frac{\delta \zeta_y}{\delta y} + \frac{\delta \zeta_z}{\delta z} \right] + \frac{1}{C_p} \frac{\delta S_0}{\delta t} \quad (4.3.15)$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = -\left[\frac{\delta F_x}{\delta x} + \frac{\delta F_y}{\delta y} + \frac{\delta F_z}{\delta z} \right] + \frac{1}{C_p} \frac{\delta S_0}{\delta t} \quad (4.3.16)$$

Donde ζ_i y F_i corresponde al flujo de calor en $[W/m^2]$ y $[mK/s]$ respectivamente y el término $\frac{1}{C_p} \frac{\delta S_0}{\delta t}$ representa una fuente de calor. C_p el calor específico del aire húmedo, que puede ser relacionado con el aire seco por medio de:

$$C_p = C_{pd}(1 + 0,84\omega) \quad (4.3.17)$$

Con $C_{pd} = 1004,67[J/kgK]$ [55]. El término F_i incluye calentamiento radiativo, calor latente durante la condensación, disipación de energía turbulenta en forma de calor, calor de reacciones químicas, convección o interacción turbulenta, entre otras.

Si relacionamos la definición dada para Δ_d , la ley de los gases ideales y la primera ley de la termodinámica, tenemos:

$$\Sigma_d = \frac{\delta T}{\delta z} = - \left[\frac{|g|}{C_p} \right] = -9,8 \left[\frac{K}{km} \right] \quad (4.3.18)$$

$$\frac{\delta T}{T} = \left(\frac{\delta P}{P} \right) \frac{R_d}{C_p} \quad (4.3.19)$$

Al existir cambio de fase, con liberación o absorción de calor latente, se genera una variación en función de la presión y la temperatura del aire libre.

$$\Sigma_s = \Sigma_d \frac{1 + (d\omega_s/T)}{1 + (b\omega_s/T^2)} \quad (4.3.20)$$

$$\frac{\delta T}{\delta P} = \frac{aT + c\omega_s}{P[1 + (b\omega_s/T^2)]} \quad (4.3.21)$$

Con $a = 0,28571$, $b = 1,35 \times 10^7 [K^2]$, $c = 2488,4 [K]$, $d = 8711 [K]$ y $\Delta_d = 9,8 [K/km]$ [55].

Flujos de calor: El gradiente de flujo de calor $\delta F/\delta x_i$ de la primera Ley puede ser causado por diferentes fenómenos como: advección, convección, turbulencia, radiación o conducción.

El **flujo advectivo** se relaciona con el flujo de calor siendo soplado desde o hacia una región por el viento en un movimiento horizontal y se comporta de manera turbulenta, pero su efecto neto se anula [55]. Si la variación de la velocidad del viento es pequeña en el sitio de estudio, entonces se puede considerar:

$$\frac{\delta F_{x,adv}}{\delta x} = \frac{u(T_{right} - T_{left})}{x_{right} - x_{left}} = u \frac{\delta T}{\delta x} = u \frac{\delta \theta}{\delta x} \quad (4.3.22)$$

$$\frac{\delta F_{y,adv}}{\delta y} = v \frac{\delta T}{\delta x} v \frac{\delta \theta}{\delta y} \quad (4.3.23)$$

El **flujo convectivo** describe el movimiento vertical generado por la flotabilidad, se presenta en dos formas: calor sensible y calor latente, ambos con un comportamiento turbulento. El primero, se relaciona con el cambio de temperatura y el segundo con el cambio de fase del agua contenida en el aire.

El **flujo radiativo** se considera despreciable en el calentamiento del aire, pues este se comporta transparente a la radiación de onda corta proveniente del Sol. Sin embargo, la radiación afecta la superficie terrestre y es ésta la que genera el calentamiento del aire. Debido a que la temperatura de la atmósfera a gran altura es mucho menos a la de la superficie, la radiación de onda larga en dirección a la atmósfera es mucho mayor que la dirigida a la superficie. Si se considera que la temperatura media de la Tierra es constante en el tiempo, debe existir un balance entre la radiación entrante y saliente, así la radiación que incide sobre la superficie de la Tierra desde el Sol $R_{d,c}$ y de la atmósfera $R_{d,l}$, debe ser igual a la cantidad de energía que se refleja desde la superficie $R_{u,c}$ más la que emite la Tierra hacia el espacio $R_{u,l}$. [28]

4.3.1. Balance energético

Como se mencionó anteriormente, la energía almacenada por la superficie terrestre durante el ciclo diurno del Sol es la responsable del calentamiento o enfriamiento del aire. De lo anterior, es posible realizar un balance de energía en dicha superficie. ([51],[28],[54])

$$\Delta R_n = \Delta Q_{cond} + \Delta_{conv,l} + \Delta_{conv,s} \quad (4.3.24)$$

Se considera que el **flujo de calor radiante** ΣR_n incide durante el día sobre la superficie terrestre y por la noche, debido al gradiente de temperatura con el espacio exterior, se invierte y la energía es liberada hacia la atmósfera.

El **flujo por conducción** Δ_{cond} es el responsable del calentamiento interno de la tierra durante el día hasta los 0,5[m] de profundidad [15], la velocidad de este flujo depende de los componentes del suelo, el grado de porosidad y el contenido de humedad. Se puede estimar mediante la siguiente parametrización.

$$\Delta Q_{cond} = X \Delta R_n \quad (4.3.25)$$

Donde X toma un valor de 0,1 durante el día y 0,5 durante la noche([55],[56],[42]), de manera alternativa, se puede estimar como $\Delta Q_{cond} = 0,3 Q_{con,l}$. [56]

El flujo convectivo del calor sensible $\Delta Q_{conv,s}$ y de calor latente $\Delta Q_{conv,l}$, describen la energía del aire en relación a la temperatura y la evaporación o condensación del agua, es decir, la adición o extracción de vapor de agua. Durante el día, la energía radiante puede vaporizar agua y, por tanto, aumentar el contenido de calor latente en el

aire. Debido a que la temperatura de la superficie es mayor a la del aire, se produce un gradiente de temperatura que favorece el flujo de calor sensible hacia las capas de aire más cercanas. Por la noche, se invierte el sentido del flujo, al disminuir progresivamente la temperatura del suelo y por tanto, el flujo de calor sensible es en dirección hacia la superficie, lo mismo ocurre con el contenido de calor latente que disminuye producto de la pérdida de vapor de agua, pues el agua se condensa al disminuir la temperatura.

Para relacionar $\Delta Q_{\text{conv},s}$ y $\Delta Q_{\text{conv},l}$ sobre una superficie, se utiliza la **razón de Bowen** β . los valores de β son mayores para superficies secas y menores para las húmedas.

$$\beta = \frac{Q_{\text{conv},s}}{Q_{\text{conv},l}} = \gamma \frac{\delta\theta}{\delta\omega} \quad (4.3.26)$$

$$\delta\theta \approx T(z_2) - T(z_1) + 0,0098[\text{K/m}](z_2 - z_1) \quad (4.3.27)$$

$$\delta\omega \approx \omega(z_2) - \omega(z_1) \quad (4.3.28)$$

$$\gamma = 0,4 \left[\frac{m_v}{m_a K} \right] \quad (4.3.29)$$

Donde γ corresponde a la constante psicométrica o pendiente de la curva de enfriamiento por evaporación. Como se puede ver en la ecuación anterior, el vapor de β se puede obtener fácilmente al medir la humedad específica a dos alturas (por medio de la humedad relativa) y el potencial de temperatura. De lo anterior, se desprende que, con mediciones de humedad y temperatura a dos alturas, junto con el flujo neto de radiación se pueden obtener los flujos verticales de calor y humedad. Quedando el balance energético sobre un volumen fijo de aire como:

$$\Delta R_n = \Delta Q_{\text{cond}} + \Delta_{\text{conv},l} + \Delta_{\text{conv},s} + \Delta_{\text{adv}}\Delta S + P_r[\text{W/m}^2] \quad (4.3.30)$$

El flujo advectivo Δ_{adv} es representativo de masas en aire en movimiento horizontal, que provocan un cambio en la temperatura, estos tienen origen en el calentamiento no uniforme de la Tierra entre las zonas polares y ecuatoriales. La variable P_r representa la energía relacionada con la fotosíntesis y la respiración de las plantas, generalmente se desprecia por su bajo orden de magnitud. Por último, el término ΔS representa el cambio en la energía almacenada en el volumen de control.

Balance de energía en una helada: En noches con presencia de helada, el flujo radiativo neto es en dirección a la atmósfera, la radiación neta de onda larga $R_{n,L}$

toma valores entre 73 y 95[W/m²], dependiendo de la temperatura y humedad. Con cielos totalmente cubiertos de espera un valor cercano a 10[W/m²] para nubes bajas y 80[W/m²]. [51] Por lo tanto:

$$10 \leq R_L \leq 95[\text{W/m}^2] \quad (4.3.31)$$

El flujo advectivo neto es prácticamente cero [51] si se considera el caso general y más frecuente de una helada radiativa, y P_r despreciable en relación al orden de magnitud de los otros factores. Si se considera que no existe rocío ni formación de hielo y la evaporación es mínima, la componente del flujo convectivo por calor latente es despreciable $\Delta Q_{\text{conv},l}$ [51]. Por otra parte, la componente de calor sensible es en dirección a la superficie, por la disminución de la temperatura de esta en relación al aire.

Luego, el balance de energía de la superficie durante una helada radiativa, antes del alba y sin condensación, queda:

$$(1 - X)\Delta R_n = \Delta Q_{\text{conv},s} + \Delta S[\text{W/m}^2] \quad (4.3.32)$$

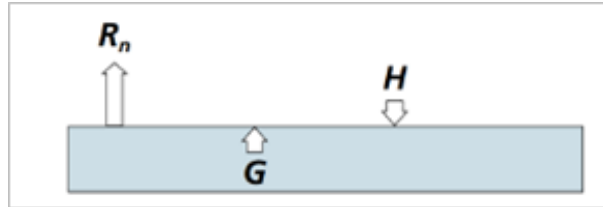


Figura 4.4: Balance de energía de una superficie durante una helada radiativa, antes del alba y sin condensación [51].

Si se considera la ocurrencia de condensación de vapor, entonces la componente latente del flujo convectivo se debe incluir en el balance energético.

$$(1 - X)\Delta R_n = \Delta Q_{\text{conv},l} + \Delta Q_{\text{conv},s} + \Delta S[\text{W/m}^2] \quad (4.3.33)$$

$$(1 - X)\Delta R_n = \left(\frac{\beta + 1}{\beta} \right) \Delta Q_{\text{conv},s} + \Delta S[\text{W/m}^2] \quad (4.3.34)$$

En general, las heladas radiativas presentan convección prácticamente nula, lo que impide la mezcla del aire frío con el cálido, determinando temperaturas muy bajas y a ras del suelo. [47]

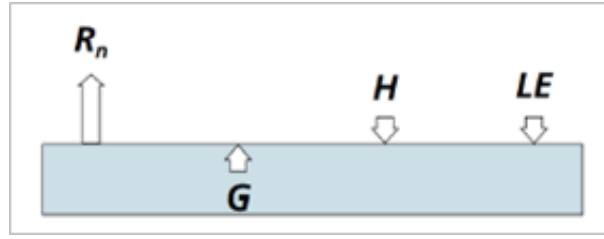


Figura 4.5: Balance de energía de una superficie durante una helada radiativa, antes del alba y considerando condensación [51].

4.3.2. Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno aleatorio del movimiento de las parcelas de aire provocados por remolinos de entre 2[mm] a 2[km]. La interacción entre las parcelas de aire a distintas temperaturas y provenientes de diferentes localizaciones generan el flujo de calor, su efecto homogeniza estas parcelas en relación al gradiente de temperatura, velocidad del viento y humedad.

El análisis local de la turbulencia de la componente sensible del flujo convectivo requiere despreciar los remolinos a gran escala, lo que se realiza por medio de la teoría K o gradiente de transporte, que entrega una buena aproximación para regiones donde la capa superficial corresponde hasta el 10 % de la capa límite atmosférica y establece que el calor fluye bajo un gradiente del potencial de temperatura desde una mayor a una menor.

$$F_{\text{conv},z} = \overline{w'\theta'} = K \frac{\delta\theta}{\delta z} \quad (4.3.35)$$

$$K = k^2 z^2 \left| \frac{\delta M}{\delta z} \right| \quad (4.3.36)$$

K se denomina viscosidad de remolino, tiene unidades de [m²/s] y toma valores mayores a medida que aumenta la intensidad de la turbulencia, k=0.4 corresponde a la constante de Von Kármán [55] y $\delta M/\delta z$ el esfuerzo cortante del viento, obtenido de la variación de la velocidad M con respecto a la altura z. La teoría K funciona adecuadamente para capas superficiales ventosas y tiene dificultades para una capa límite convectiva donde no es adecuado su uso.

4.4. Ecuaciones gobernantes

4.4.1. Ecuaciones de continuidad

Las moléculas de aire no se convierten en energía, por lo tanto, la masa se conserva. Así, la masa dentro de un volumen fijo corresponde a la diferencia entre la masa que entra y sale de este, lo anterior, es descrito por la ecuación de balance de masa.

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} = -\rho \left(\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \right) \quad (4.4.1)$$

La intensidad a una altura fija, cambia ligeramente con la humedad y la temperatura en condiciones climáticas comunes. Por esto, puede ser despreciado el cambio de la densidad dentro del volumen y se considera el aire como un fluido incompresible. De lo anterior, la ecuación de continuidad se puede reescribir como:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0 \quad (4.4.2)$$

Entorno a los centros de baja de presión cercanas a la superficie, el arrastre producto de la turbulencia genera la entrada de un flujo horizontal dentro de la Capa límite atmosférica (CLA), el que es balanceado por la salida de un flujo vertical desde el límite superior, característico de mal tiempo. En cuanto a los centros de alta presión, el arrastre producto de la turbulencia genera a la salida de un flujo horizontal balanceado por un flujo vertical entrante en el límite superior de la CLA, característico de buenas condiciones climáticas.

Capítulo 5

Metodología de Simulación

La metodología utilizada para la resolución del problema de la presente investigación corresponde al método de volúmenes finitos, que divide al volumen de control en una cantidad finita de celdas y para cada una se asocia un set correspondiente de ecuaciones discretizadas, a las que se dará solución por medio del software Ansys Fluent 19.1.

La simulación se basa en análisis expuesto por Desmond [18], utilizando transporte de esfuerzos cortantes (SST) para cerrar el sistema de turbulencia. Los efectos de la estabilidad atmosférica son tomados en cuenta, añadiendo una ecuación de transporte adicional para la temperatura potencial θ , e incluyendo los efectos de la estabilidad en la ecuación de momentum vertical ($F_{B,i}$) y en el modelo de turbulencia (turbulencia producida por la flotación P_{kB} , definida más adelante). El modelo también permite incluir el efecto de la fuerza de Coriolis, mediante una diferencia en el balance geostrófico, para capturar efectos asociados con el desarrollo de un espiral de Eckman en la capa límite.

El efecto del cultivo sobre el flujo se modela por medio de una término cuadrático de la resistencia en las ecuaciones de moméntum, así como las fuentes y sumideros en el modelo de turbulencia que consideren la producción de esta y el largo de la escala. Las fuerzas de arrastre (tanto fuentes como sumideros) se aplican a todo el volumen de control, las cuales se ubican por debajo del canopy del campo de cultivo.

5.1. Ecuaciones gobernantes

Para todas las simulaciones se considera un flujo incomprensible. Se emplea la aproximación de Boussinesq que considera las fuerzas de flotación debido a que existe

una densidad del flujo no constante. Estos efectos son válidos para la ecuación de la velocidad vertical y la modelación de la turbulencia. Por ello, el modelo resuelve las siguientes ecuaciones.

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (5.1.1)$$

Moméntum:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = & -\frac{\partial}{\partial x_i} p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma} \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & + F_{B,i} + F_{Cor,i} + F_{D,i} \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

Con fuerzas de cuerpo según la ecuación 5.1.3:

$$F_{B,i} = g\beta\rho_{ref}(\theta - \theta_{ref})\delta_{i3} \quad \text{Flotabilidad} \quad (5.1.3)$$

$$F_{Cor,i} = \rho f[(U_i - U_{i,geo})\delta_{i1} - (U_i - U_{i,geo})\delta_{i2}] \quad \text{Coriolis} \quad (5.1.4)$$

$$F_{D,i} = -\frac{1}{2}\rho C_d A(z)|U|U_i \quad \text{Arrastre de vegetación} \quad (5.1.5)$$

Donde $A(z)$ es la densidad de área foliar (LAD) que se denota por:

$$LAD = \frac{LA(\text{Área de la hoja})[m^2]}{V_C(\text{Volumen del canopy})[m^3]} \quad (5.1.6)$$

LAD representa la distribución del índice de área foliar (LAI) a lo largo del canopy. Es por esto que, el valor V_C se puede interpretar como el volumen del canopy [52]. Se aproxima según la estructura geométrica más similar que asemeje (esfera, elipsoide, etc.).

Por consiguiente, según Lalic y Mihailovic[33], se expresa como:

$$A(z) = A_{max} \left(\frac{H - z_{max}}{H - z} \right)^n \exp \left[n \left(1 - \frac{H - z_{max}}{H - z} \right)^n \right] \quad (5.1.7)$$

A su vez, A_{max} es el valor máximo del LAD, z_{max} la altura de medición de A_{max} , H la altura del árbol y n un coeficiente calculado según:

$$n = \begin{cases} 6 & \text{si } 0 \leq z \leq z_{\max} \\ \frac{1}{2} & \text{si } z_{\max} \leq z \leq H \end{cases} \quad (5.1.8)$$

En general, $A_{\max}$ y $z_{\max}$ son propiedades del árbol, determinadas por el estado fenológico del mismo. Según Carrasco y Benavides [11], y considerando las dimensiones del cultivo de cerezos, además de sus estados fenológicos a través del tiempo [23], se sabe que:

$$z_{\max} = 0,58H \quad (5.1.9)$$

En tanto, los valores de densidad de área foliar LAD para el caso específico de un cultivo de 2 tipos de cerezos de aproximadamente 3 [m] de altura varía según su estado fenológico de acuerdo a los gráficos de las Figuras 5.1 y 5.2. ([11],[23])

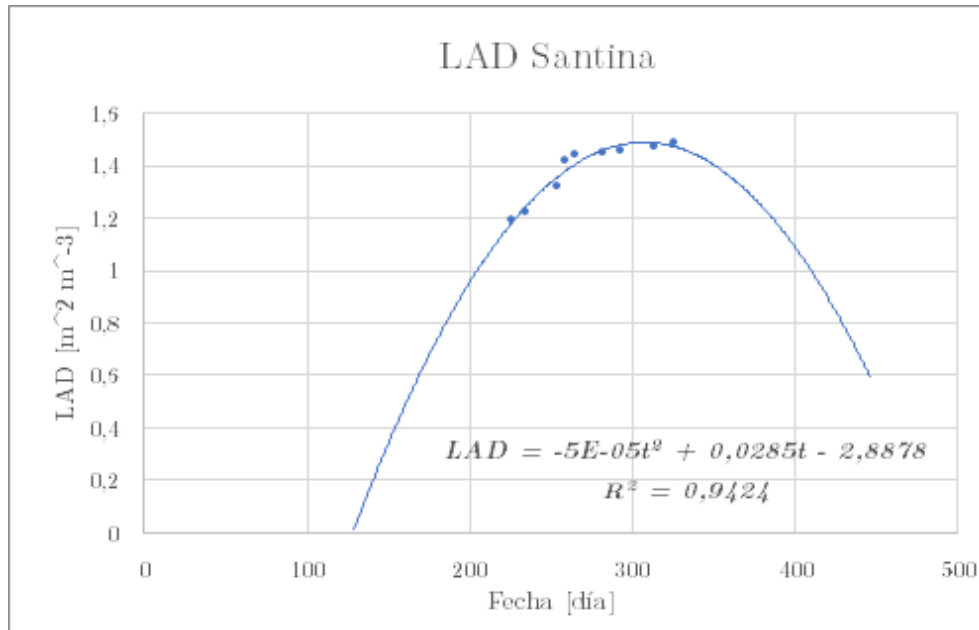


Figura 5.1: Evolución del LAD a través del ciclo fenológico de un cultivo de cerezo tipo Santina.

El valor máximo del LAD alcanza los 1,49 [m²m⁻³], a los cuales se les aplicó un ajuste del tipo polinómico de segundo grado con una regresión cercana del 94 %. Se presenta una proyección del LAD en el periodo post-cosecha.

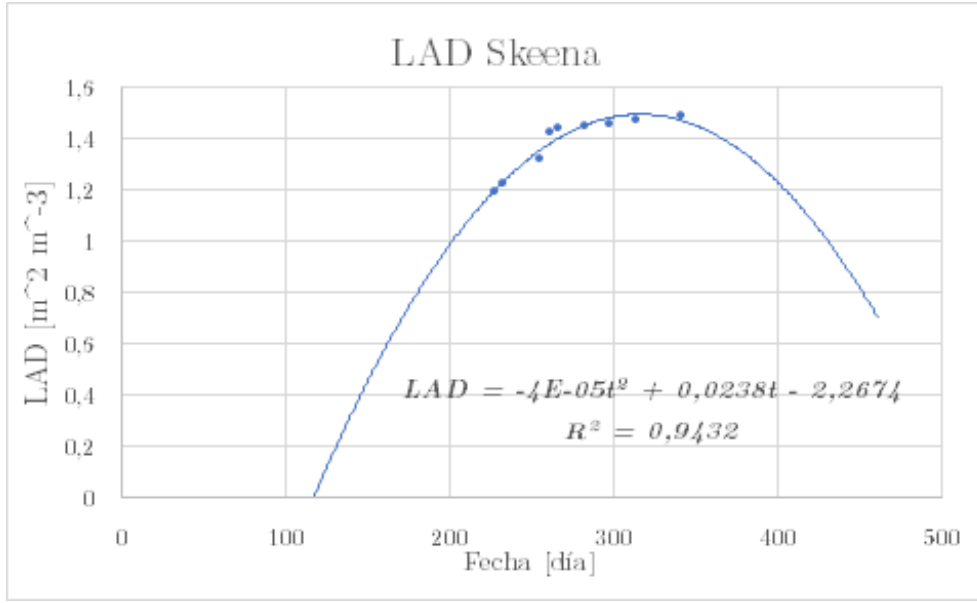


Figura 5.2: Evolución del LAD a través del ciclo fenológico de un cultivo de cerezo tipo Skeena.

Energía: La cual se basa en la temperatura potencial θ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\theta) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \theta) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_\theta} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_j} \right) \right] \quad (5.1.10)$$

Cierre de la turbulencia: En tanto el cierre de la turbulencia mediante el modelo SST de 2 ecuaciones se basa en la ecuación 5.1.11 [39][38].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] \\ + P_k + P_{kB} - \rho C_\mu \omega_k + S_k \end{aligned} \quad (5.1.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_{\omega 3}} \right) \left(\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ + \rho \frac{\alpha_3}{\mu_T} P_k + P_{\omega B} - \beta_3 \rho \omega^2 + S_\omega \end{aligned} \quad (5.1.12)$$

Donde F_1 es una función de mezcla definida como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega u}, \frac{500\nu}{z^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} z^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (5.1.13)$$

F_1 es 1 dentro de la capa límite y tiende a 0 en las regiones de flujo libre [39].

El efecto de la flotabilidad en la energía cinética turbulenta se incluye mediante el término fuente P_{kB} :

$$P_{kB} = -\frac{\mu_T}{\sigma_\theta} g \beta \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \text{Fuente de flotación para } k \quad (5.1.14)$$

Para la ecuación de frecuencia de vórtices, el efecto de la flotabilidad se incluye mediante:

$$P_{\omega B} = \frac{\omega}{k} [(\alpha_3 + 1) C_3 \max(P_{kB}, 0) - P_{kB}] \quad \text{Fuente de flotación para } \omega \quad (5.1.15)$$

El nivel de turbulencia de mezcla en la simulación se modela via viscosidad de vórtice μ_T , el cual se calcula en el modelo SST mediante:

$$\mu_T = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (5.1.16)$$

donde el limitante viscoso es activado por la función F_2 sólo cerca de la pared, mientras que fuera de la capa límite F_2 es cero [39]. Notar que, al ser la viscosidad la resistencia de un fluido a fluir, entre mayor sea la resistencia que oponga, menos fluirá este y viceversa. De otra manera, se puede entender la viscosidad de vórtice como el ratio entre la producción y disipación de la energía cinética turbulenta. Entre mayor sea la rugosidad aerodinámica del cultivo, mayor será la producción de k , aumentando a su vez μ_T , mientras que para superficies más lisas, predomina la disipación.

$$F_2 = \tanh \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega z}, \frac{500\nu}{z^2 \omega} \right)^2 \right) \quad (5.1.17)$$

S es una medición invariante de la tasa de tensión:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.1.18)$$

Otra característica del modelo SST a considerar es el uso del límite de producción de corte para evitar la sobreproducción de la energía cinética de la turbulencia (TKE) en regiones de estancamiento. El término de producción de la turbulencia $P_k = \mu_T S^2$ es implementado mediante el límite:

$$P_k = \min(P_k, C_{lim} \rho \epsilon) \quad (5.1.19)$$

Donde C_{lim} es equivalente a $10[-]$ [18].

El efecto del arrastre sobre el cultivo sobre los valores de la turbulencia ha sido discutido por otros autores [14][29][?][57], por lo general, en modelos tipo $k-\epsilon$. Para este tipo de modelo, las fuentes y sumideros son añadidos a la energía cinética turbulenta k y la ecuación de disipación de la turbulencia ϵ para modelar las escalas del largo de redistribución y de turbulencia como:

La ecuación de energía cinética turbulenta:

$$S_k = F_F \frac{1}{2} \rho C_d A(z) |U| [\beta_p |U|^2 - \beta_d k] \quad (5.1.20)$$

donde β_p y β_d son constantes, cuyos valores se muestran en el Cuadro 5.1.

Los términos de las fuentes son:

$$S_\omega = F_F \frac{1}{2} \rho C_d A(z) |U| \omega \left[\frac{(C_{\epsilon 4} \beta_p |U|^2)}{k} - (C_{\epsilon 5} - 1) \beta_d \right] \quad (5.1.21)$$

Donde $C_{\epsilon 4}$ y $C_{\epsilon 5}$ son constantes que se entregan en el Cuadro 5.1. En tanto, F_F toma el valor de 1 dentro del área con vegetación y 0 fuera de ella.

Este término de la fuente para la ecuación de ω se deriva de la relación genérica:

$$S_\omega = -\frac{\omega}{k} S_k + \frac{1}{C_\mu k} S_\epsilon \quad (5.1.22)$$

Con ello, se tiene una equivalencia entre ϵ y ω como $\epsilon = C_\mu \omega k$.

El modo apropiado para encontrar las constantes introducidas anteriormente aún es discutido. En la presente investigación, se utilizan valores recomendados por Costa para bosques, en terrenos complejos. [14]

Cuadro 5.1: Constantes de modelación para la parametrización del canopy. [14]

Constante	Valor
β_p	0,17
β_d	3,37
$C_{\epsilon 4}$	0,9
$C_{\epsilon 5}$	0,9

5.1.1. Parametrización del cultivo

En la presente investigación, se modelan los cultivos como un continuo, caracterizado por un largo de rugosidad aerodinámica z_0 y un coeficiente de arrastre C_d .

El **largo de rugosidad aerodinámica** se modela según lo propuesto por Shaw y Pereira [49], aquí se introduce el parámetro de proporcionalidad λ , definido por:

$$z_0 = \lambda(h - d) \quad (5.1.23)$$

donde h es la altura del canopy y h/d la altura de canopy normalizada, mientras que $\lambda = 0,36$ para cultivos artificiales. [61]. Adicionalmente, se define la altura de desplazamiento como:

$$d = ah^b \quad (5.1.24)$$

con $a=0,702$ y $b=0,9793$.

En 2008, Zilitenkevich [65] ajusta los valores del largo de rugosidad aerodinámica y altura de desplazamiento en atmósferas neutrales (z_0, d_0), para atmósferas estratificadas (z_{0u}, d_{0u}), según:

$$\frac{z_{0u}}{z_0} = 1 + (5,31 \pm 0,18) Ri^{(6/13)} \quad (5.1.25)$$

$$\frac{d_{0u}}{d_0} = 1 + (2,61 \pm 0,17) Ri^{(6/13)} \quad (5.1.26)$$

Se dice que el flujo es dinámicamente inestable y turbulento si:

$$\begin{aligned} Ri &< Ri_c \\ Ri &< 0 \end{aligned} \quad (5.1.27)$$

donde $Ri_c = 0,25$ es número de Richardson crítico, de lo contrario, se considera flujo dinámicamente estable. A su vez, se define:

$$Ri = 0,0365(h_0/L)^{(13/18)} \quad (5.1.28)$$

L es la longitud de Obhukov [40], definida por:

$$L = \frac{\rho C_p T_{ref} u_*^3}{\kappa g Q_H} \quad (5.1.29)$$

Donde T_{ref} es, por lo general, 300 [K] [30] y Q_H , el flujo de calor sensible, se define como $Q_H = \rho C_p C_H u (\theta_0 - \theta_a)$, donde $\theta_0 - \theta_a$ es el diferencial de la temperatura potencial entre la superficie y el aire.

Por otro lado, C_H es el coeficiente de intercambio por calor sensible. Este valor necesita ser determinado antes de evaluar el flujo de calor sensible mediante la teoría de semejanza de Monin-Obukhov definida como:

$$C_H = \kappa^2 \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right) \right]^{-1} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) - \Psi_h \left(\frac{z - d_0}{L} \right) \right]^{-1} \quad (5.1.30)$$

Con z como la altura de medición de referencia. Luego, se tienen las funciones de semejanza Ψ_m y Ψ_h que tienen relación con Φ_m y Φ_h , las cuales son funciones dimensionales que miden la estabilidad atmosférica para el flujo de momento y de calor sensible, respectivamente. Estos valores se definen como: [10]

$$z/L \geq 0, \quad \Psi_m = \Psi_h = -\frac{5(z - d_0)}{L} \quad (5.1.31)$$

$$\begin{aligned} z/L \leq 0, \quad \Psi_m &= \ln \left[\left(\frac{1 + x^2}{2} \right) \left(\frac{1 + x}{2} \right)^2 \right] - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2} \\ z/L \leq 0, \quad \Psi_h &= 2 \ln \left[\frac{(1 + x)^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (5.1.32)$$

Donde x es $\left(1 - 16 \left(\frac{z - d_0}{L} \right) \right)^{0.25}$. Con ello, es plausible calcular u_* :

$$u_* = \frac{\kappa(u - u_0)}{\ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right)} \quad (5.1.33)$$

El cociente z/L es un parámetro de medición de la estabilidad según Monin-Obukhov que evalúa los efectos de la flotabilidad frente a los efectos del esfuerzo de corte. Finalmente, la longitud de Obukhov L es evaluada. La velocidad de fricción u_* como el flujo de calor sensible H deben ser estimados para determinar L o viceversa. Por

lo tanto, L se debe calcular según un método iterativo. Ψ_m y Ψ_h serán iguales a 0 cuando el valor inicial de L se asume en un estabilidad atmosférica neutral ($= 10^{15}$). La condición de iteración siempre y cuando el ratio $(L_n - L_{n-1})/L_{n-1}$ sea menor al 1 % [34].

El **coeficiente de arrastre**, se considera 0,15, según Kormas[32] y Katul [29]. Además, u representa la velocidad del viento [m/s] a la altura de medición.

5.2. Malla Computacional y condiciones de borde

El dominio computacional se reparte en dos áreas, una zona cultivada, compuesta de cultivos de Santana y Skeena, y una buffer zone. Los cultivos, se representan por hileras de elipsoides truncados de 3,2 [m] de altura y distintas curvaturas para distinguir el tipo de cerezo y su efecto en la formación de la capa límite como se ve en la Figura 5.5.

Los perfiles de velocidad y de energía cinética turbulenta (TKE) en el inflow, se obtienen de los perfiles teóricos de Monin - Obukhov, para condiciones neutrales:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}, \quad k = \frac{u_*^2}{\sqrt{\beta^*}}, \quad \omega = \frac{|u_*|}{\sqrt{\beta^*} \kappa z} \quad (5.2.1)$$

Donde κ es la constante de Von Karman. Para vientos leves sobre superficies relativamente planas donde la rugosidad es baja[24], las mediciones sugieren $\kappa = 0,41$, aproximación que se acoge en este estudio. Las funciones de pared siguen un ajuste de la ley logarítmica de Monin-Obukhov para atmósferas estables, basadas en el largo de rugosidad estimado. En el borde superior, la velocidad es igual a la de flujo libre y la TKE se considera cero. Condiciones de Neumann (primera derivada igual a cero), se aplican en el outflow y bordes laterales.

5.2.1. Construcción de la malla computacional

Se construye la malla computacional de forma que ésta sea más refinada en los sectores donde se encuentra el cultivo (más rugoso) y sea más espaciada en sectores menos rugosos, tal como se muestra en la Figura 5.3.

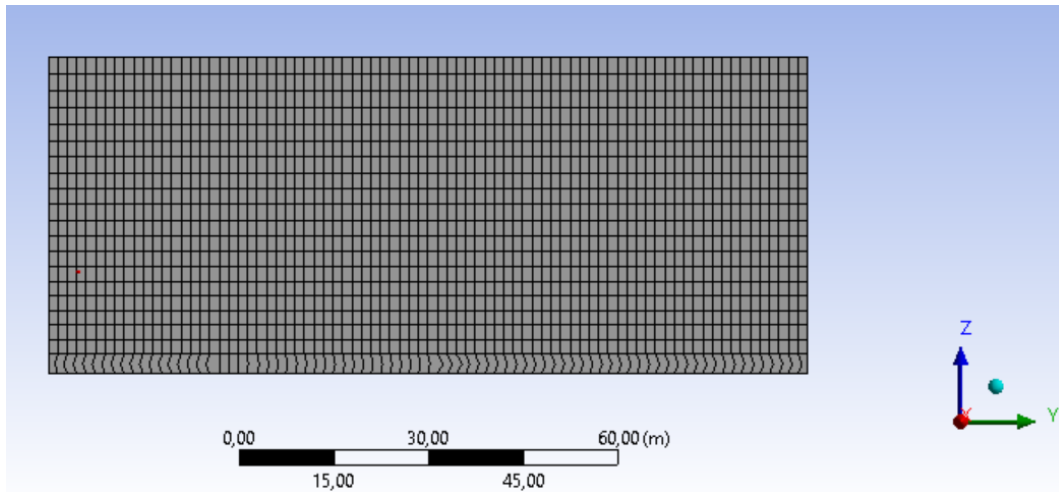


Figura 5.3: Malla computacional en el plano yz.

Además, para replicar fielmente la localidad que se simula, mostrada en la Figura 5.4, se construyen dos parches de cultivos, Santina y Skeena, como se muestra en la Figura 5.5.

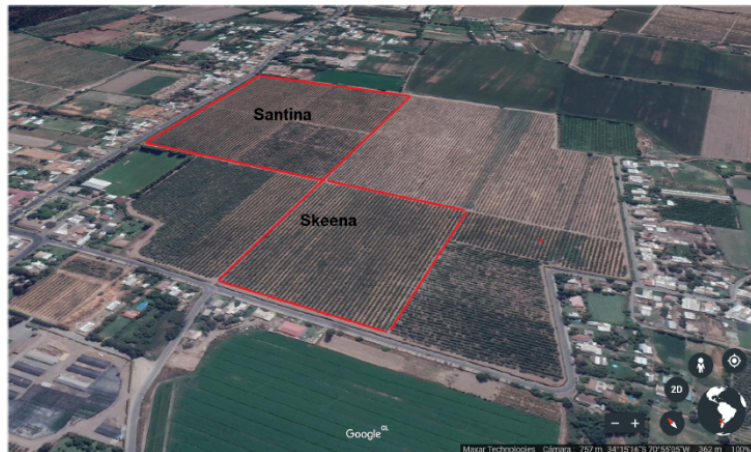
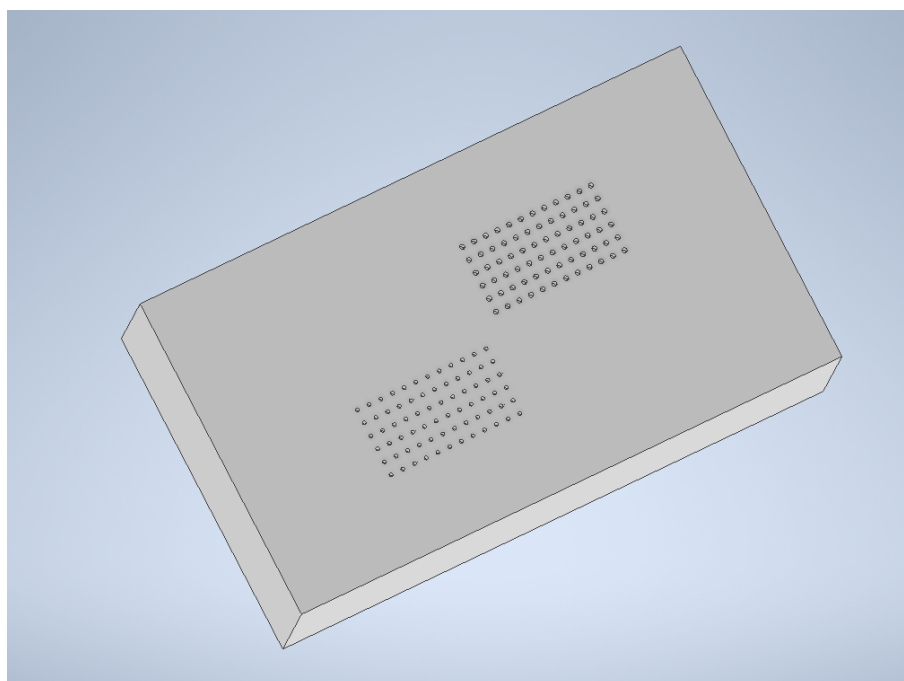
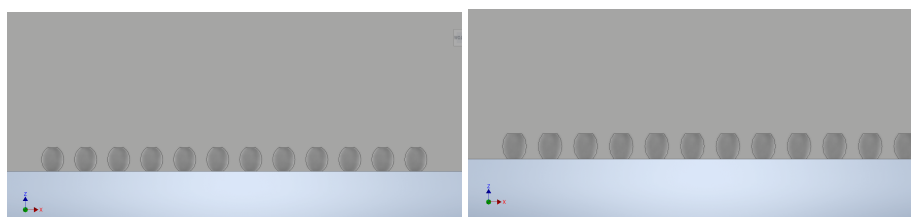


Figura 5.4: Cultivos de cerezo en Viveros de Copequen

Esta malla adaptada está construida en base a la existencia de 3 puntos entre cada árbol con el objetivo de obtener un mejor cálculo de cada parámetro. En el eje x, se consideró una longitud de 208,5[m], con 139 divisiones, obteniendo 140 puntos distanciados en un $\Delta x = 1,5$ [m]. En el eje y, 120[m] se dividieron 80 veces, obteniendo $\Delta y = 1,5$ [m], cabe mencionar que las medidas consideran 100 y 60[m] de buffer zone en x e y, respectivamente, correspondientes al 100 % de las dimensiones del cultivo, para potenciar el desarrollo del flujo. En el eje z, se utilizó una discretización exponencial para refinar la zona del canopy, obteniendo un total de 20 divisiones en 50 [m] de altura.



(a) Geometría de simulación.



(b) Hilera de árboles especie Santina.

(c) Hilera de árboles especie Skeena.

Figura 5.5: Geometría de simulación (a), con detalle en corte de hileras de árboles especie Santina (b) y Skeena (c)

Como se muestra en la Figura 5.5, cada árbol se encuentra distanciados a 4,5[m] en el eje x, mientras que en el eje y están a 5[m] cada uno. En tanto, la distribución geográfica se da en 24 árboles a lo largo del eje x y 12 en el y. En total, la muestra considera 144 árboles que representarían de manera fidedigna al campo en estudio.

5.2.2. Condiciones de borde

En la presente investigación, se estudian distintas fechas del año, para ver cómo el fenómeno de estudio se comporta dependiendo de la estación. Los casos de enero, julio y septiembre, corresponden a días fríos característicos, correspondientes a cada mes,

mientras que el escenario "helada" corresponde a uno donde ocurre una helada radiativa. A continuación, las ecuaciones 5.2.2 y 5.2.3, muestran los perfiles de velocidad y temperatura característicos, para todos los escenarios, por otro lado, el Cuadro 5.2 muestra las temperaturas y velocidades características de cada escenario [1].

$$u(z) = \frac{u_0 * \log(z/z_0)}{\kappa} \quad (5.2.2)$$

$$T(z) = 1,00455(-20,16 \exp(z - /71,25) + T_0) + 273,15[K] \quad (5.2.3)$$

El perfil de temperatura, es de tipo semiempírico, pues fue definido para una atmósfera estáticamente estable y ajustado según características propias de la zona de Viveros de Copequen.

Cuadro 5.2: Características de escenarios de estudio.

Fecha	u_{ref} [m/s]	T_{ref} [°C]
Enero 2020	1,3	10,0
Julio 2020	0,7	7,0
Septiembre 2020	0,4	4,0

Cabe mencionar, que las velocidades y temperaturas de referencias fueron medidas por torres meteorológicas, a los $z_{ref} = 3[m]$ de altura, por lo que se cumple:

$$u_{ref} = \frac{u_0 * \log(z_{ref}/z_0)}{\kappa} \quad (5.2.4)$$

$$T_{ref} = 1,00455(-20,16 \exp(z_{ref} - /71,25) + T_0) + 273,15[K] \quad (5.2.5)$$

Las condiciones de borde se fijan en una velocidad referencial acorde al escenario de estudio, con una constante de von Kármán $\kappa = 0,41$. En tanto, $\beta^* = 0,09$ y z_0 que corresponde al largo de rugosidad aerodinámica se calcula empleando las relaciones 5.1.23 y 5.1.24, en donde h es la altura del canopy equivalente a los 3,2[m]. Por consiguiente, el valor de z_0 resulta en 0,3265[m] en el canopy y 0,1[m] a nivel del suelo. Estos valores obtenidos se fijan en la entrada del dominio (condición de borde **inlet**), así como en el canopy y superficie del suelo.

De esta manera los perfiles de velocidad para cada escenario quedan conformados según el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3: Perfiles de velocidad iniciales.

Fecha	Fenómeno	Perfil de Velocidad
Enero 2020	Helada	$0,2043/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$
Julio 2020	Helada	$0,1294/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$
Septiembre 2020	Helada	$0,0739/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$
Helada	Helada	$0,0185/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$

Con κ como la constante de von Kármán equivalente a 0,41, $z_0=0,3265$ [m] y z como la altura de medición variable.

Análogamente, se obtienen los perfiles de temperatura expresados en el Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4: Perfiles de temperatura iniciales.

Fecha	Fenómeno	Perfil de Temperatura
Enero 2020	Helada	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 29,28) + 273,15$
Julio 2020	Helada	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 26,30) + 273,15$
Septiembre 2020	Helada	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 23,31) + 273,15$
Helada	Helada	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 20,32) + 273,15$

En las caras laterales y superior, se establecen condiciones no deslizamiento con una tapa móvil a la rapidez y temperatura de referencia. Por otro lado, para las superficies del suelo se imponen condiciones de no deslizamiento. Mientras la entrada considera velocidad con discretización vertical, la salida se establece como pressure outlet.

Se empleó una inicialización estándar de 1000 iteraciones calculadas desde la condición de borde de entrada **inlet**.

Set up Los factores de relajación se toman de investigaciones precedentes [23], y se muestran en la Figura 5.6.

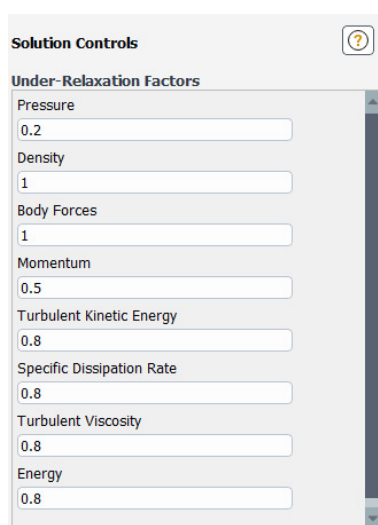


Figura 5.6: Factores de relajación.

Inicialización. Se empleó una inicialización estándar de 1000 iteraciones calculadas desde la condición de borde de entrada **inlet**.

5.2.3. Estabilidad Atmosférica

Previo a las simulaciones en los meses de enero, julio y septiembre, se debe estudiarla estructura de la capa límite atmosférica (CLA) a modo de conocer la estratificación. La turbulencia juega un rol en la mezcla de las capas que se encuentran a distintas alturas que dominan los procesos mecánicos y térmicos. De esta manera se sabe cómo se comportarán los vientos, procesos de enfriamiento, evaporación y transpiración.

Para los 5 escenarios de estudio, a través del Número de Richardson y el largo de Obukhov se estudia la caracterización de la atmósfera en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5.5: Número de Richardson, Largo de Obukhov y Estratificación.

Fecha	Fenómeno	Ri [-]	L [m]	Estratificación
Enero 2020	Helada	0,037	-3,168	Estable
Julio 2020	Helada	0,026	-5,237	Estable
Septiembre 2020	Helada	0,074	-1,217	Estable

Como todos los valores del Número de Richardson se mantienen bajo los 0,25 según la relación 5.1.27, se sostiene que el flujo es dinámicamente estable. Con esta conclusión las simulaciones se realizan en torno a una atmósfera estable.

5.3. Metodología de discretización

A continuación, se presenta la ecuación de transporte general para una propiedad del fluido genérica ϕ :

$$\frac{\delta \rho \phi}{\delta t} = \Delta \cdot (\rho \phi \vec{u}) = \Delta \cdot (\Gamma \Delta \phi) + S_\phi \quad (5.3.1)$$

La integración de la ecuación anterior sobre un volumen finito, con la aplicación del teorema de Gauss, permite obtener:

$$\int_{CV} \rho \phi dV + \int_A \hat{n}(\rho \phi \vec{u}) dA = \int_A \hat{n}(\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (5.3.2)$$

Al discretizar espacialmente la ecuación 5.3.2 a través de la regla del punto medio se obtiene la discretización de la ecuación 5.3.3:

$$\frac{\delta(\rho \phi)}{\delta t} V + \sum_f^N (\rho_f \vec{v}_f A_f \phi_f) \hat{n} = \sum_f^N (\Gamma_\phi \nabla \phi_f) \hat{n} + S_\phi V \quad (5.3.3)$$

Donde N caras corresponde al número de caras de la subdivisión del volumen y el índice f indica el valor de la propiedad en la cara de la celda. El primer término a la izquierda de la ecuación 5.3.3 representa el cambio de la propiedad ϕ a través del tiempo, el segundo el transporte de la propiedad debido al flujo (convectivo). El primer término a la derecha representa el transporte debido al cambio de la propiedad de un punto a otro (difusivo) y el segundo la generación de ϕ en el volumen de la celda.

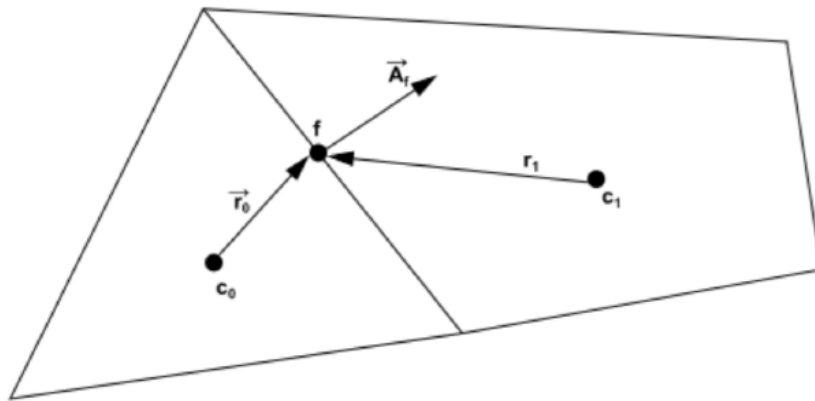


Figura 5.7: Discretización de la Ecuación General de Transporte en el Volumen de Control

5.3.1. Discretización de la ecuación general de transporte

Para determinar los valores de ϕ_f en las caras de cada celda y de $\nabla\phi_f$ se tienen diversos métodos, los más utilizados e implementados en Ansys Fluent son: first-order upwind, second-order upwind, power law, y QUICK, ya que Ansys por defecto almacena los valores de la variable en cuestión en el centro de las celdas.

First-order upwind establece que el valor al centro de la celda ϕ representa el valor promedio y para determinar el valor en la cara ϕ_f utiliza el valor de la variable al centro de la celda aguas arriba.

Second-order upwind obtiene los valores en las caras de la celda por medio de una reconstrucción multidimensional, a través de series de Taylor centradas en el centroide de la celda:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \nabla\vec{S} \quad (5.3.4)$$

Donde todos los valores del lado derecho de la ecuación son correspondientes a la celda aguas arriba respectivas. El gradiente se obtiene por medio del teorema de la divergencia, utilizando el valor promedio de la variable $\tilde{\phi}$ entre dos celdas adyacentes a la cara.

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum \tilde{\phi} \vec{A} \quad (5.3.5)$$

Power law interpola los valores de la variable a partir de la ecuación unidimensional de convección-difusión, que al ser integrada entrega el valor exacto de la variable:

$$\frac{\delta(\rho\phi u)}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} \Gamma \frac{\delta\phi}{\delta x} \quad (5.3.6)$$

QUICK se basa en una media ponderada entre el esquema second-order upwind e interpolaciones sobre los valores al centro de la celda, este proporciona valores más precisos para mallas estructuradas tipo cuadrangulares y hexaédricas alineadas con el flujo, recomendado para flujos con componentes de giro. El método de volúmenes finitos permite convertir la ecuación general de transporte discretizada a una forma linealizada con la siguiente estructura:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (5.3.7)$$

Donde n_b representa las celdas adyacentes, a_p y a_{n_b} los coeficientes linealizados de ϕ y ϕ_{n_b} . La ecuación anterior se plantea para cada celda contenida en el mallado del volumen de control, formando un set de ecuaciones representadas en forma matricial y resueltas por medio del método de Gauss-Seidel.

La primera prioridad de la simulación a realizar, será la estabilidad numérica, seguida de la precisión de esta. El fenómeno tiene un número de Reynolds alto, pues se trabaja con escalas dimensionales atmosféricas, por lo que a pesar de contar con un flujo de baja velocidad, es adecuado utilizar el modelo **QUICK**.

5.3.2. Discretización de ecuaciones de moméntum y continuidad

Para la discretización de las ecuaciones de conservación de masa y momentum, Ansys dispone de dos métodos numéricos: Pressure-based solver y Density-based solver. el primero de ellos es utilizado para flujos incompresibles de baja velocidad y el segundo para flujos compresibles de alta velocidad. Ambos obtienen el campo de velocidad a partir de la ecuación de momentum. **Por lo que el primero será utilizado en la presente investigación.**

Ecuación de moméntum La ecuación de moméntum discretizada en x es:

$$a_p u = \sum_{n_b} a_{n_b} u_{n_b} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S \quad (5.3.8)$$

Ansys por defecto almacena los valores de presión y velocidad en el centro de la celda, pero para dar solución de la ecuación anterior se requiere el valor en la cara de esta, por lo que se requiere de esquemas de interpolación para la presión y así obtener los valores de las variables requeridos. Estos esquemas son: Linear, standard, second, order, The Body Force Weighted y PRESTO!

El esquema **Lineal** calcula el valor de la presión en la cara como media de la presión en las celdas adyacentes. El esquema **Standard** interpola los valores de presión en las caras por medio de los coeficientes de la ecuación de moméntum según:

$$P_f = \frac{\frac{P_{c0}}{a_{p,c0} + \frac{P_{c1}}{a_{p,c1}}}}{\frac{1}{a_{p,c0}} + \frac{1}{a_{p1,c1}}} \quad (5.3.9)$$

Dicho esquema genera buenos resultados cuando los gradientes de presión entre los centros de las celdas son pequeños, de lo contrario genera discrepancias en los valores de la velocidad, siendo deficiente en los flujos con movimientos ciclónicos, swirls elevados (alta vorticidad) o valores altos para el número de Rayleigh. Considerar este esquema en presencia de grandes fuerzas superficiales, o geometrías curvas puede generar error, pues se asume que el gradiente de presión normal a la pared es cero.

El esquema de **Second order** reconstruye los valores de la presión en la cara de la celda utilizando la interpolación por diferencias centradas. Dicho esquema mejora la exactitud en la solución exceptuando los casos de modelos de mezcla para flujos multifase, cuando la malla es de mala calidad o en presencia de gradientes de presión discontinuos.

El esquema **The Body Force Weighted** obtiene la presión en la cara de la celda asumiendo un valor constante del gradiente de la diferencia entre la presión y las fuerzas de cuerpo, dando buenos resultados al conocerlas a priori.

El esquema **PRESTO!** utiliza el balance de masa en su forma discreta para alternar el volumen de control y obtener la presión en la cara de la celda. Permite obtener una exactitud comparable con otros algoritmos para mallas del tipo triangular, tetraédrica, híbrida y poliédrica. Este esquema es recomendado para flujos con altos números de swirls y flujos rotativos de alta velocidad, entre otros.

Se opta por un esquema tipo *second order*, debido a que no se basa en supuesto de gradiente de presión constante, de modo que representa de manera fiel el comportamiento dentro de la CLA.

Ecuación de continuidad La discretización de la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\sum_f^N J_f a_f = 0 \quad (5.3.10)$$

Donde J_f representa el flujo másico a través de la cara. El valor de la velocidad es obtenido de un promedio ponderado de momentum, utilizando factores de peso basados en a_p . J_f es obtenido a partir de los valores almacenados de presión y velocidad normales dentro de dos celdas a los lados de la cara.

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c0} v_{n,c0} + a_{p,c1} v_{n,c1}}{a_{p,c0} + a_{p,c1}} + d_c ((p_{c0} + (\nabla p)_{c0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c1} + (\nabla p)_{c1} \cdot \vec{r}_1)) \quad (5.3.11)$$

$$J_f = \tilde{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1}) \quad (5.3.12)$$

Acoplamiento Presión-Velocidad El acoplamiento presión-velocidad se realiza mediante la ecuación de continuidad discretizada para obtener una relación adicional para la presión. Ansys provee de dos formas para dar solución al fenómeno en cuestio: Segregado o Acoplado, los que difieren en si la resolución de las ecuaciones gobernantes se realiza de forma secuencial o simultánea, respectivamente. El solver segregado permite elegir entre cuatro algoritmos: SIMPLE, SIMPLEC, PISO y Fractional Step (FSM).

El modelo **SIMPLE** utiliza una relación entre la presión y la corrección de la presión que asegure satisfacer la ecuación de continuidad y así obtener el campo de presión. La ecuación de movimiento se resuelve por medio de un campo ficticio de presión p^* , que permite obtener un campo de velocidad provisorio y un flujo másico resultante J^* .

$$J_f \tilde{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (5.3.13)$$

J^* no satisface la conservación de masa, por lo que requiere de un factor de corrección del flujo másico, utilizando un factor corregido de presión:

$$\begin{aligned} J^* &= \tilde{J}^* + J' \\ J' &= d_f(p'_{c0} - p'_{c1}) \end{aligned} \quad (5.3.14)$$

Al sustituir las ecuaciones anteriores en la de continuidad discretizada, se obtiene la

ecuación corregida para la presión en cada celda:

$$\begin{aligned} a_p p' &= \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \\ b &= \sum_f^N J_f^* A_f \end{aligned} \quad (5.3.15)$$

Con b el flujo de masa entrante. De las ecuaciones anterior, se obtiene la presión en la celda y el flujo en las caras, que se corrigen a través del factor de relajación α para la presión, satisfaciendo la ecuación de continuidad.

$$\begin{aligned} p &= p^* + \alpha_p p' \\ J &= J_f^* + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \end{aligned} \quad (5.3.16)$$

si α toma valores entre $[0,1]$, se denomina factor de subrelajación y si sobrepasa la unidad de sobrerelajación, el primer caso determina una mayor estabilidad computacional y menor velocidad de convergencia. De observarse un comportamiento inestable, se propone disminuir los valores de α_m para la presión hasta 0.2.

SIMPLEC trabaja de forma similar a **SIMPLE**, con la diferencia en el coeficiente d_f del flujo, siendo este una función de $a_p - \sum_{nb} a_{nb}$ que permite acelerar la convergencia si esta se ve restringida por el acoplamiento de la presión-velocidad. Este algoritmo se recomienda para flujos simples donde la convergencia esté condicionada principalmente por el acoplamiento presión-velocidad, logrando una mayor rapidez de convergencia que **SIMPLE**, en casos más complejos, lograrán tasas de convergencia similares. De igual forma, se recomiendan estos algoritmos para flujos transientes con pasos de tiempos cortos, utilizados en modelos de turbulencia LES, pues requieren menor capacidad computacional.

El factor de relajación recomendado para este algoritmo es 1 que permite acelerar la convergencia, valores superiores, aumentan la inestabilidad para mañías muy asimétricas, utilizando un valor más conservados (0.7).

PISO usa un procedimiento similar a los mencionados anteriormente, pero evitando

el cálculo repetitivo de las velocidades y flujos respectivos al no satisfacer la ecuación de momento luego de resolver la ecuación de presión corregida. Para mejorar la eficiencia del cálculo, este procedimiento implementa dos correcciones adicionales: neighbor y skewness corrections. El primero, permite realizar los cálculos reiterativos dentro de la etapa de solución de la ecuación de presión corregida, disminuyendo el número de iteraciones requeridas para la convergencia. El segundo, luego de dar solución a la ecuación corregida de presión, recalcula el gradiente asociado y lo utiliza para actualizar el valor de la corrección del flujo másico, reduciendo la dificultad en la convergencia para mallas asimétricas.

Este algoritmo con la corrección neighbor, es recomendado para flujos transitorios, con grandes pasos de tiempo, pero sin generar mayor diferencia con los algoritmos SIMPLE y SIMPLEC, para pasos de tiempo pequeños, en cuyo caso se recomienda utilizar factores de corrección para todas las ecuaciones.

La corrección skewness se recomienda para mallas con gran distorsión en flujos estacionarios y transitorios, cuyos coeficientes de relajación deben sumar la unidad para las ecuaciones de presión y momento. La implementación de los dos métodos de corrección se encuentra por default en Ansys, recomendando desacoplarlos para mallas con alta distorsión.

Coupled Algorithm se diferencia de los demás por resolver las ecuaciones de momento y continuidad de forma simultánea o acoplada, mejorando la convergencia, pero con un mayor costo computacional. Este esquema funciona de manera más eficiente para problemas de estado estacionario sin cambios de fase; en comparación con los esquemas segregados, discretizando de manera implícita el gradiente de presión en la ecuación de momento y del flujo másico, logrando mayor eficiencia y rapidez de convergencia.

Teniendo lo anterior en consideración, se escoge el modelo *PISO* para la simulación, debido a que se prioriza la eficiencia numérica y tomando en cuenta que el flujo es estacionario. Este modelo se valida, si y solo si se comprueba que se cumple la ley de la conservación de la masa y de momento.

Evaluación de gradiente y derivadas La discretización de los gradientes se hace necesaria para la obtención de valores de las variables en las caras de la celda de los términos difusivos y derivadas de la velocidad en las ecuaciones de conservación. Para ello, Ansys dispone de tres esquemas: Green-Gauss Cell-Based, Green-Gauss Node-Based y Least Square Cell-Based. El primero de ellos, genera el valor del gradiente en la cara de la celda, a partir del valor de la variable obtenida del promedio aritmético entre los valores entre las caras de las celdas vecinas. El segundo, a partir del valor entre los nodos de las celdas por medio de un promedio ponderado. El tercero, asume una variación lineal, considerando la distancia entre los centroides.

Node-Based y Least Squares logran una exactitud similar en presencia de una malla asimétrica y distorsionada, donde el último posee un menor requerimiento computacional. Por lo anterior, la discretización de tipo *Least Square Cell-Based* será utilizada para la simulación.

Número CFL Por default, se utilizó un número CFL de 1, lo que implica un $\Delta t = 30[s]$. Utilizando un promedio de 8 iteraciones por paso de tiempo, se estudiaron 47[*min*] de fenómeno. Lo anterior, es pertinente, pues temperaturas tan bajas no prevalecen por largos períodos de tiempo en la atmósfera.

Capítulo 6

Calidad de simulaciones numéricas

6.1. Convergencia de malla

Se simuló el fenómeno de heladas en el mes de septiembre en tres mallas diferentes, sus características se muestran en el Cuadro 6.1, mientras que el Cuadro 6.2 muestra las relaciones de refinamiento de malla r .

Cuadro 6.1: Características de mallas de estudio

Parámetro	Malla fina	Malla media	Malla gruesa
$\Delta x, y [m]$	1.5	2	3
Puntos en z	20	15	10
Nodos totales	1.262.105	737.783	367.504
Elementos totales	300.696	173.676	84.506

Cuadro 6.2: Relación de refinamiento de mallas r .

Parámetro	Media-Fina	Gruesa-Media	Gruesa-Fina
r	1,3	1,5	2,0

Cada una de las simulaciones se realizó para un total de 750 y 1000 iteraciones. A la mitad de las iteraciones total se aprecia una estabilidad de los valores residuales de la ecuación de continuidad. En el caso de la malla fina se consigue residuales del orden de los 10^{-2} , mientras que para las mallas de calidades más bajas se logra una convergencia de orden 10^{-3} . Las comparaciones entre cada calidad se pueden observar en las Figura 6.1

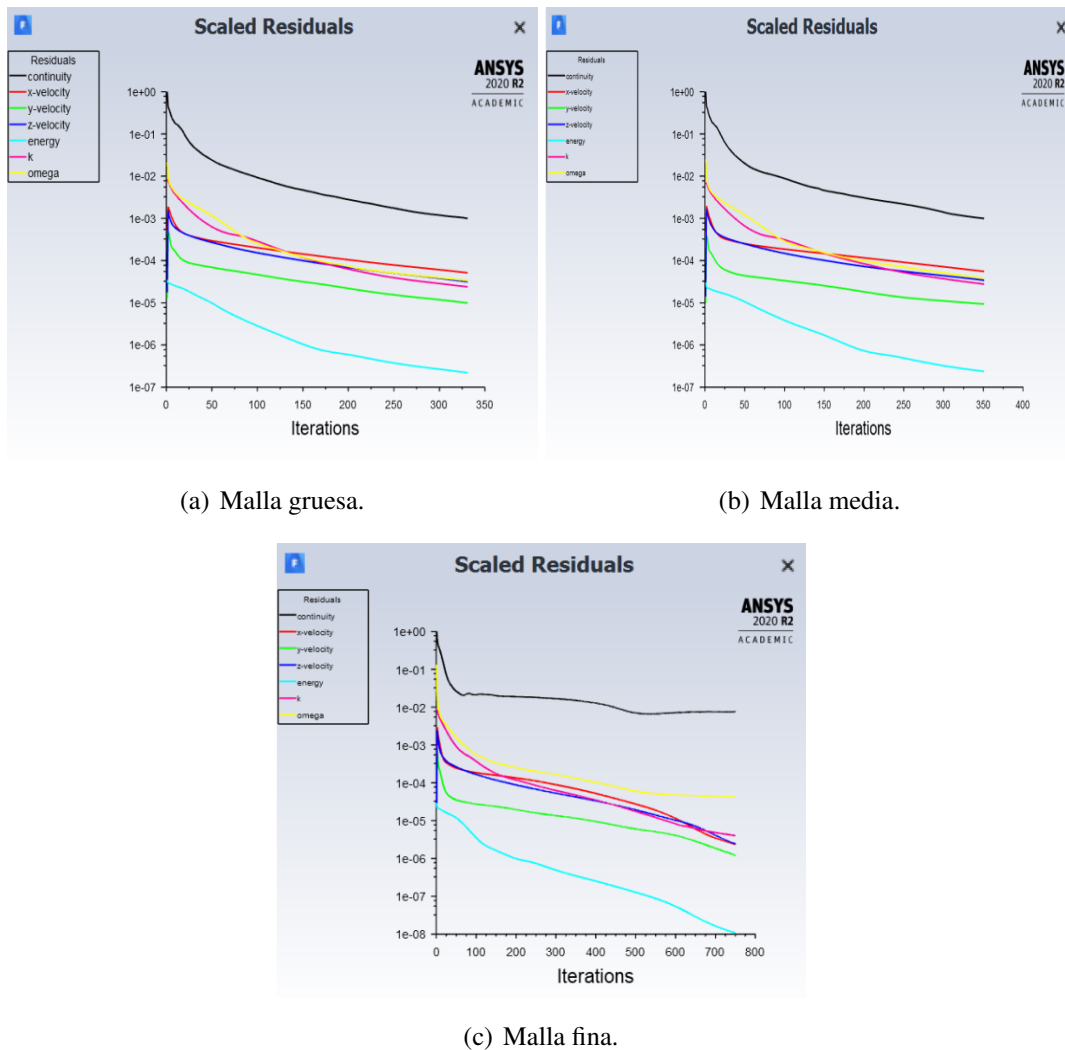


Figura 6.1: Comportamientos residuales para una simulación en el mes de septiembre con una malla gruesa (a), media (b) y fina (c).

La convergencia, sobretodo en la ecuación de continuidad, se suaviza a medida que la malla disminuye en calidad y es la que determina en definitiva el tiempo de convergencia.

La cantidad de puntos que se escogen para cada simulación influyen considerablemente los tiempos de convergencia, dada por aumentos exponenciales en sus duraciones. Para el caso de una malla de baja calidad, toma 10 minutos lograr una convergencia en cada parámetro de interés. En tanto, para una malla de calidad media, el tiempo promedio de simulación requiere de 27 minutos, lo que representa casi un triple de duración en comparación a una malla más gruesa. Finalmente, la malla de mejor calidad requería de un promedio de tiempo de aproximadamente 90 minutos.

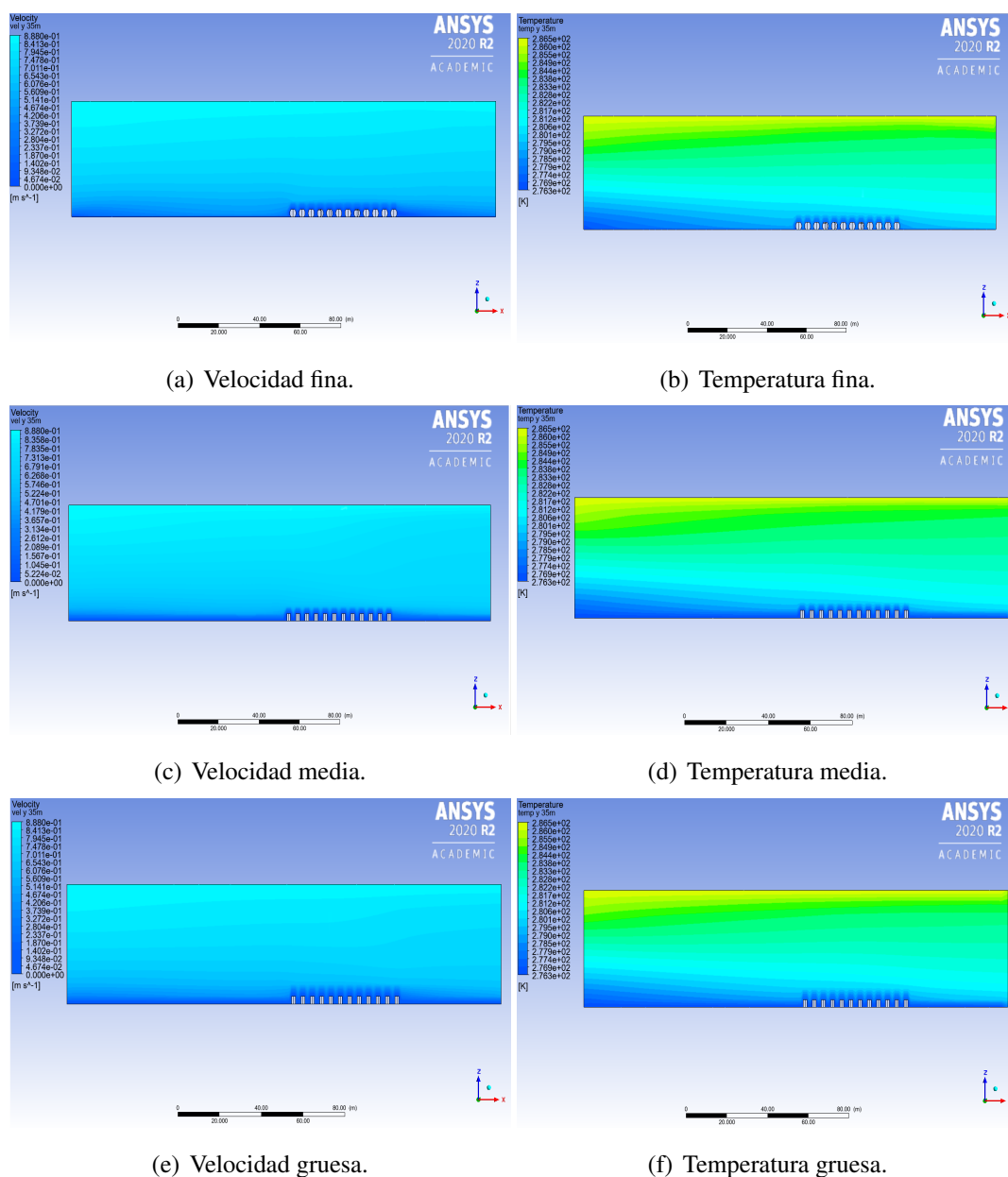


Figura 6.2: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xz a $y=35[m]$, los escenarios fríos característicos en septiembre 2020, con mallas fina (arriba), media (medio) y gruesa (abajo)

La tendencia indica que al aumentar la cantidad de puntos de la malla, se triplica el tiempo de simulación. Entre las razones se encuentran una mayor cantidad de puntos entre cada hilera de cerezos que sumado al cambio constante entre un árbol y el cambio entre un área no cultivada provocan este efecto. Otro factor a considerar es el

aumento al doble de la cantidad de puntos en altura y la geometría compleja de los árboles.

Pese al mayor tiempo de convergencia, se escoge la malla fina, pues esta es capaz de mostrar más fielmente el comportamiento en los primeros metros de altura y entre el cultivo, zonas de mayor interés. La Figura 6.2 muestra los campos de velocidad y temperatura, en el plano xz, con $y = 60$ [m].

Se observa que los perfiles no sufren mayor variación en cuanto a su forma a medida que se aumenta la refinación de la malla, es por esto que se considera que se ha alcanzado la independencia de mallas.

6.2. Eficiencia computacional

Los tiempos de simulación en malla fina para los distintos escenarios, se registraron en el Cuadro 6.3, obteniendo un tiempo promedio de simulación de 93,4 [min].

Cuadro 6.3: Tiempo de simulación de diferentes escenarios.

Escenario	Tiempo de simulación [min]
Septiembre	82
Julio	98
Enero	87
Helada	93

Teniendo en consideración que se trabajó con 1.3 millones de nodos, que otorgan mayor precisión al modelo, se estima que la malla utilizada optimiza la relación costo/eficiencia computacional. Además, se utilizó la mayor refinación posible con una licencia de Ansys Student.

6.3. Estabilidad numérica

Con el fin de evaluar la estabilidad numérica de la simulación, se comparan los residuales de las simulaciones de distintos escenarios, como se muestra en la Figura 6.3. Se logra observar que la ecuación de continuidad de masa es la que determina la convergencia de la simulación. Además, su residual alcanza valores mínimos de

$10^{-2}[\text{kg/s}]$, teniendo en cuenta el tamaño del volumen de control, este valor se considera despreciable.

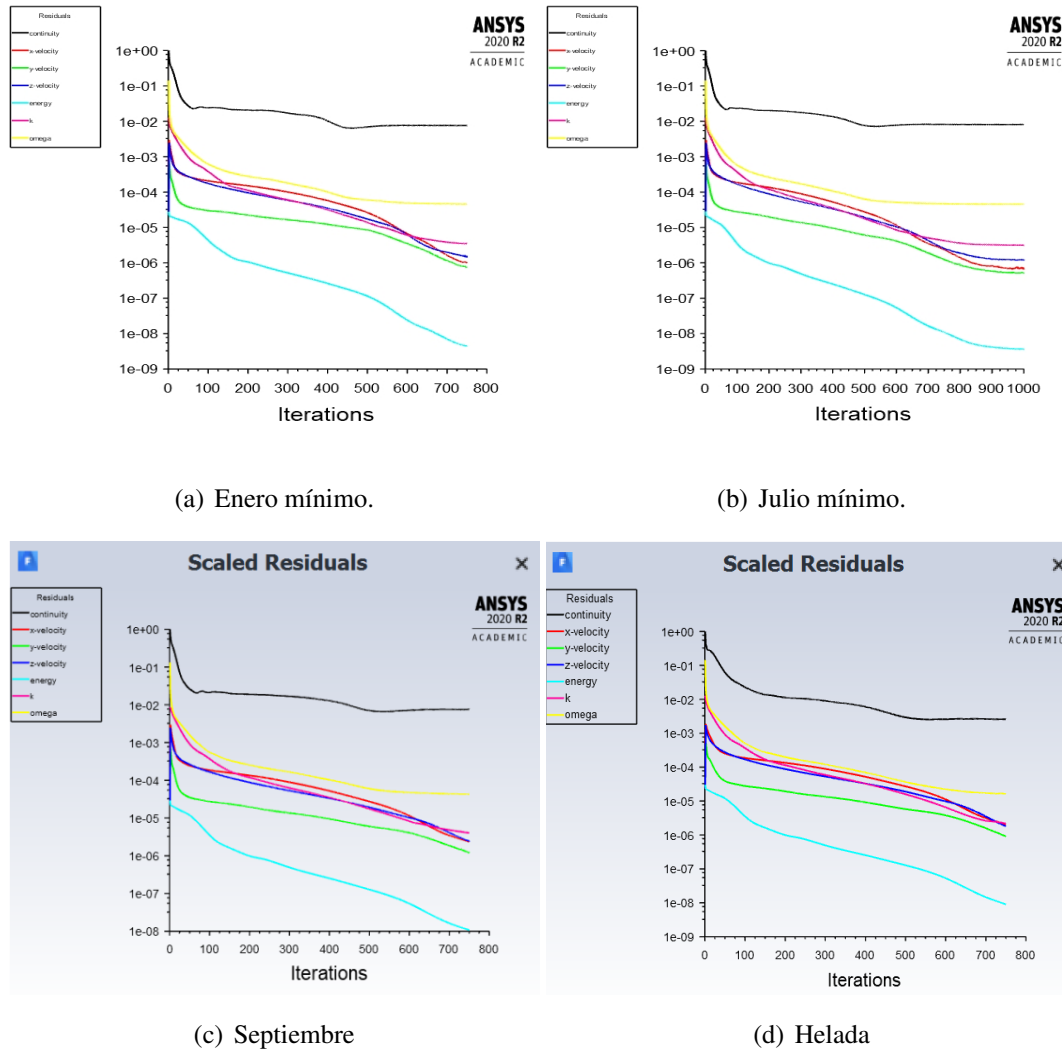


Figura 6.3: Comportamientos residuales para las simulaciones de enero, julio y septiembre.

Capítulo 7

Resultados

7.1. Validación de resultados

Conforme a la data disponible de investigaciones anteriores [23], se ingresan los parámetros iniciales de temperatura y velocidad del viento correspondientes a la localidad de Copequén en el año 2018 y que son simulados a nivel meso escalar en el mes de Septiembre expuestos en el Cuadro 7.1. De forma análoga se hace el análisis para los meses de Enero y Julio.

Cuadro 7.1: Perfiles iniciales.

Fecha	Perfil de Temperatura [k]	Perfil de Velocidad [m/s]
Enero 2020	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 29,28) + 273,15$	$0,2043/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$
Julio 2020	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 26,30) + 273,15$	$0,1294/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$
Septiembre 2020	$1,00455(-20,16 \exp(-z/71,25) + 23,31) + 273,15$	$0,0739/\kappa \cdot \ln(z/z_0)$

Con κ como la constante de von Kármán equivalente a 0,41, $z_0=0,3265$ [m] y z como la altura de medición (3 [m]).

Estos valores son asignados en la condición de borde **Velocity Inlet**, en donde se ingresa un perfil de la velocidad y un perfil de temperatura.

7.2. Análisis termodinámico

Figura 7.1: Plano xy en $z=0.3[m]$ En los primeros 30 centímetros del cultivo, en donde se hallan los troncos del cerezo, se observa un comportamiento del perfil de velocidad que se repite en los 3 momentos del año con la formación de una zona de estancamiento del viento luego de pasar por el primer cultivo, así como en el segundo. En cuanto a los resultados térmicos, se replica el patrón con temperaturas más bajas dentro del canopy y en los primeros metros de la primera zona sin cultivo producto de un flujo en reversa. Cabe mencionar, que mientras menor es la temperatura promedio (Septiembre), mayor será la cantidad de flujo por la parte trasera, esto se observa por el manchón celeste presente en el campo de temperaturas de septiembre en la Figura 7.1.

Figura 7.2: Plano xy en $z=1[m]$ Realizando un corte sobre los primeros metros de la zona vegetativa se notan mayores diferencias en el comportamiento dinámico reflejados en una aceleración del flujos en las regiones sin presencia de cultivo. Térmicamente, las diferencias principales se marcan en la formación de una zona con temperaturas levemente altas. A ambos fenómenos se les atribuye a que parte del flujo del viento se recanaliza y se devuelve en las zonas sin cultivo formando estas zonas cuasisimétricas.

En la Figura 7.2, se observa la presencia de masas calientes de aire en las cercanías del outlet, lo que indica que el cultivo de santina se vera impactado en mayor medida por las heladas.

Figura 7.3: Plano xy en $z=3.3[m]$ Este corte de plano representa los primeros 10 [cm] sobre el canopy. Como se esperaba, hay un aumento de velocidad leve en lo general y en zonas con nula presencia del cultivo. En cuanto al análisis térmico, existen diferencias a la salida del dominio en el lado derecho de la geometría con la presencia de una región con temperaturas un tanto mayores. Lo anterior se debe a que en el mes de septiembre hay una menor adhesión del flujo al suelo aguas abajo lo que redunda en una expansión de la zona con mayores temperaturas que rodea el segundo sector del cultivo.

Se puede ver que el flujo tiende a desprenderse, y luego se produce un reattachment en aproximadamente un tercio del primer cultivo. En la Figura 7.3 se ve que el flujo recupera su momentum, al salir del primer cultivo.

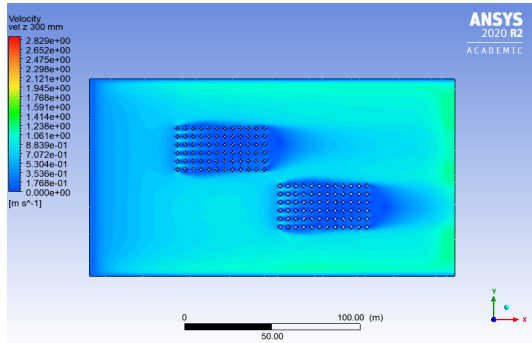
Figura 7.4: Plano xy en $z=18[m]$ A los 18 metros de altura, se observa un campo

de temperatura más homogéneo y cálido que en capas inferiores, esto se condice con la mayor velocidad, que produce una turbulencia elevada, promoviendo la mezcla de masas de aire. En promedio, las diferencias de temperaturas entre la zona del cultivo y la altura de las máquinas de viento son $4[^\circ\text{C}]$, esto se debe tener en cuenta al momento de combatir una helada, pues si se quiere revertir una disminución mayor a cuatro grados, será necesario prender calefactores para prevenir los daños.

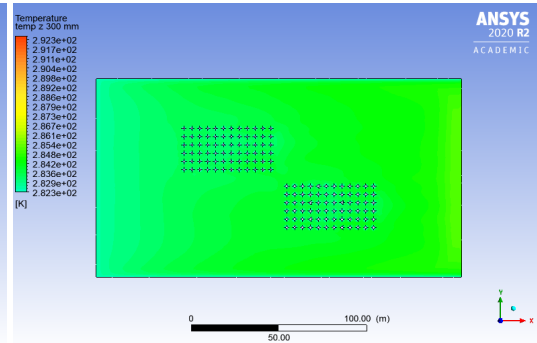
Figura 7.5: Plano xz en $y=35[\text{m}]$ Resulta interesante estudiar cómo reacciona el flujo a la presencia de un cultivo, es por esto que se analiza el plano $y=35$, a través de la primera hilera de cultivo de Skeena, la Figura 7.5 muestra lo indicado.

En esta vista, se observa que el flujo se levanta levemente al ingresar al cultivo, generando una burbuja de separación compuesta de aire frío, causando que el aire caliente pase por sobre el cultivo, readhiriéndose a una distancia similar al largo del cultivo, aguas abajo. Esto tiene consecuencias en la cantidad de movimiento, en la advección de sustancias químicas, de masas de aire frío y caliente.

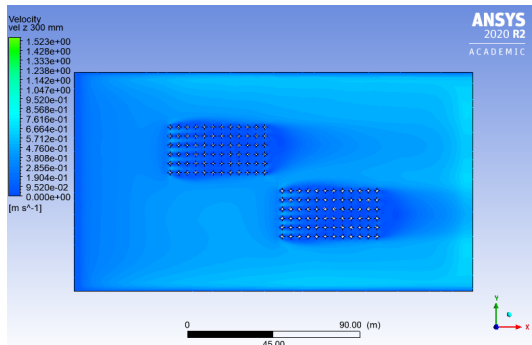
Figura 7.6: Plano yz en $x=134[\text{m}]$ El presente plano, muestra un corte intermedio en la zona del cultivo Santana. Se observa una zona de pseudo estancamiento entre el cultivo, produciendo una baja de temperaturas en el mismo, de aproximadamente $5[^\circ\text{C}]$. Como se observa en la Figura 7.5, este estancamiento no es permanente, sino que la capa límite se vuelve a adherir aguas abajo.



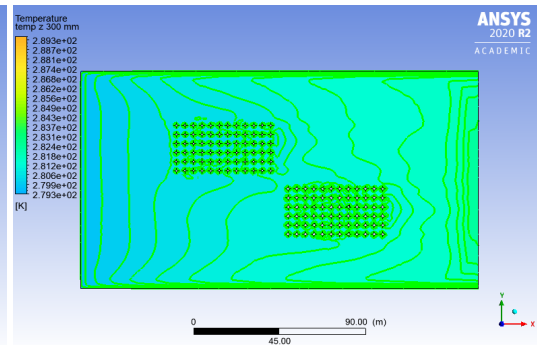
(a) Velocidad enero.



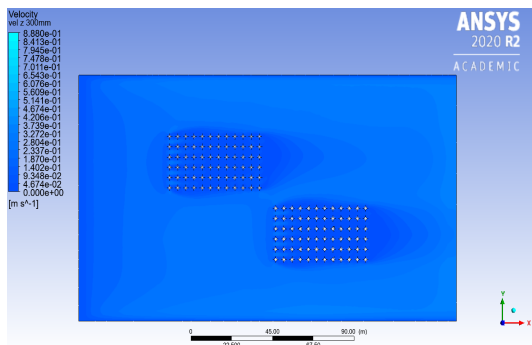
(b) Temperatura enero.



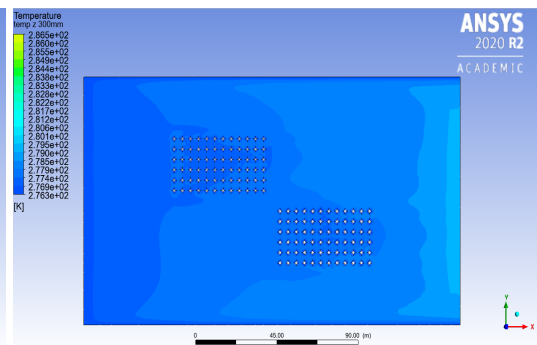
(c) Velocidad julio.



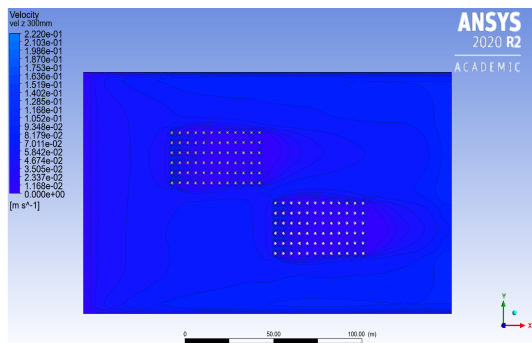
(d) Temperatura julio.



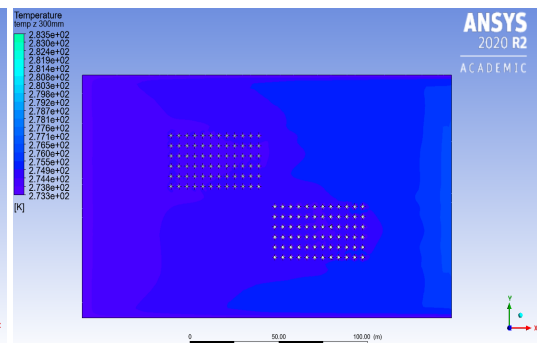
(e) Velocidad septiembre.



(f) Temperatura septiembre.

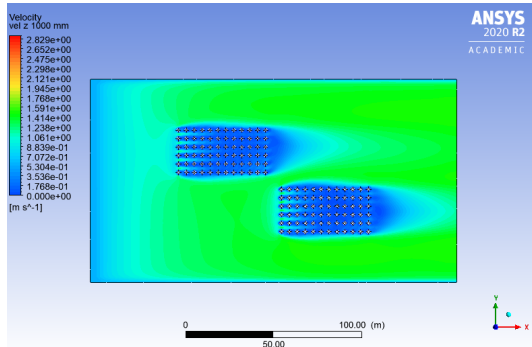


(g) Velocidad helada.

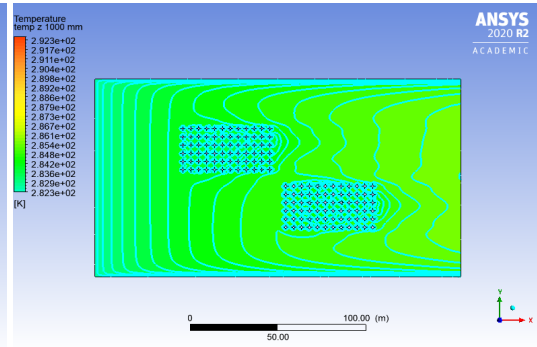


(h) Temperatura helada.

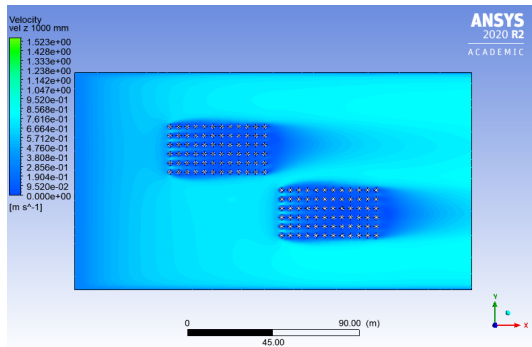
Figura 7.1: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=0.3[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).



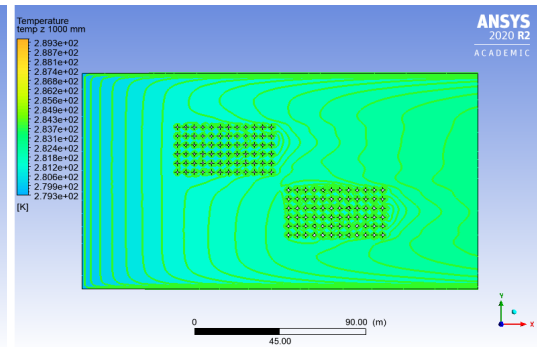
(a) Velocidad enero.



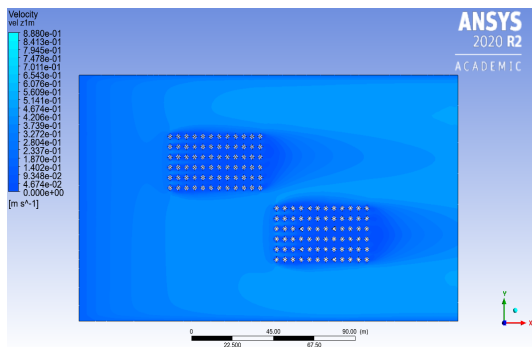
(b) Temperatura enero.



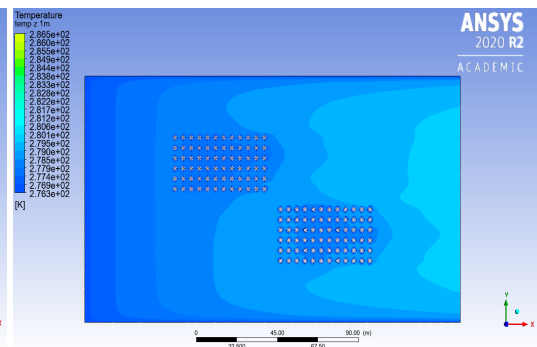
(c) Velocidad julio.



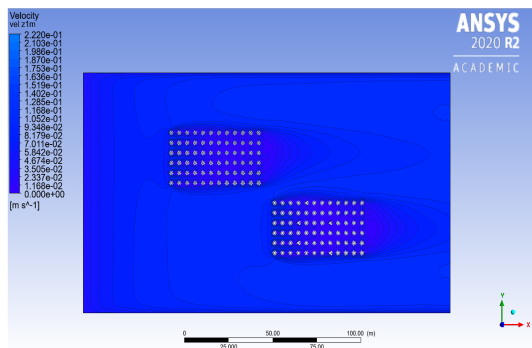
(d) Temperatura julio.



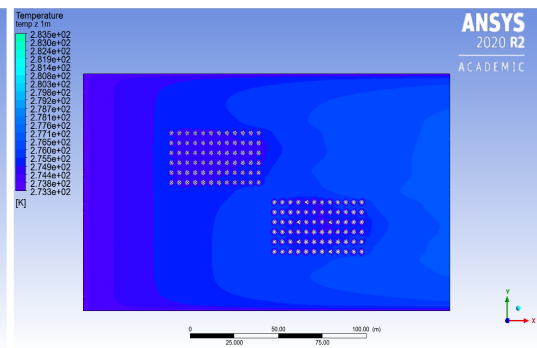
(e) Velocidad septiembre.



(f) Temperatura septiembre.

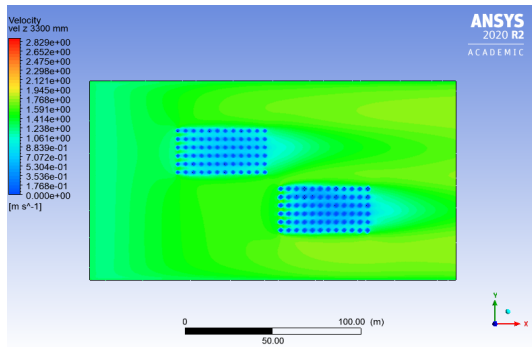


(g) Velocidad helada.

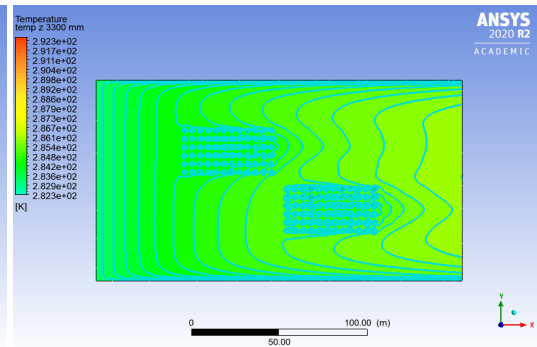


(h) Temperatura helada.

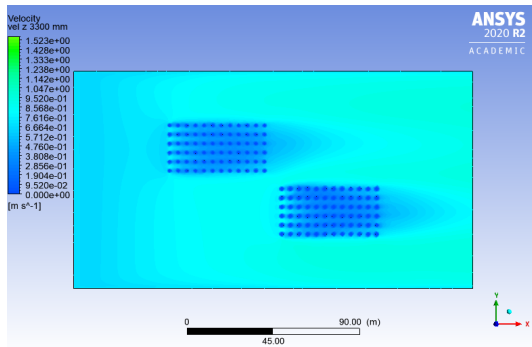
Figura 7.2: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=1[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero, julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).



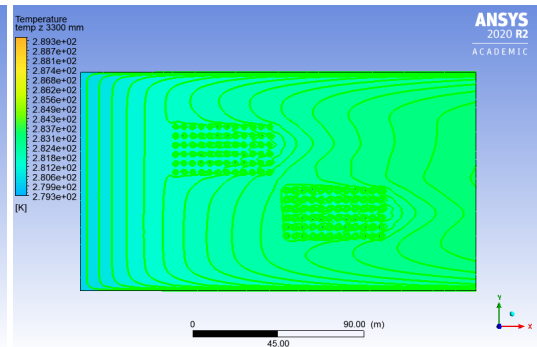
(a) Velocidad enero.



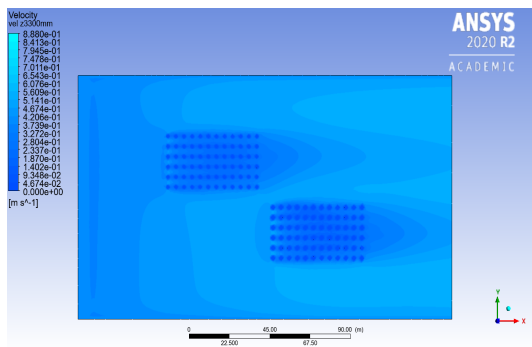
(b) Temperatura enero.



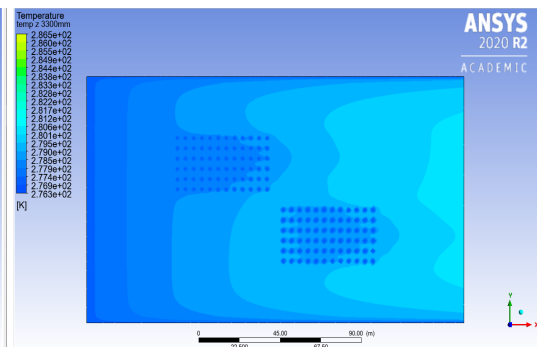
(c) Velocidad julio.



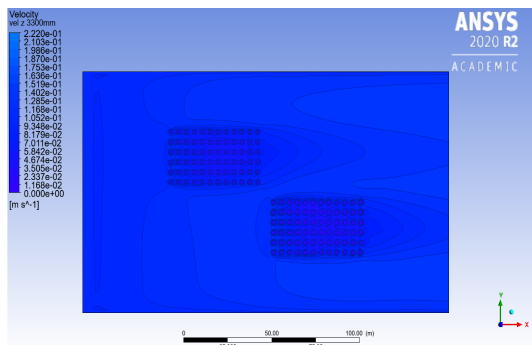
(d) Temperatura julio.



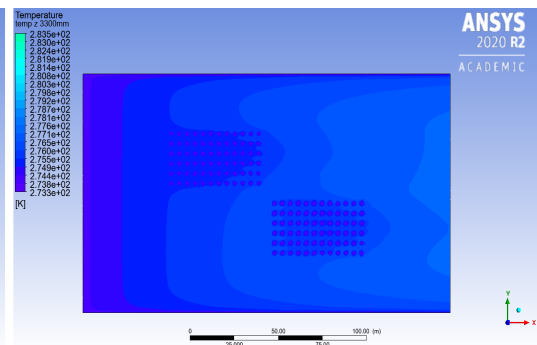
(e) Velocidad septiembre.



(f) Temperatura septiembre.



(g) Velocidad helada.



(h) Temperatura helada.

Figura 7.3: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=3.3[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).

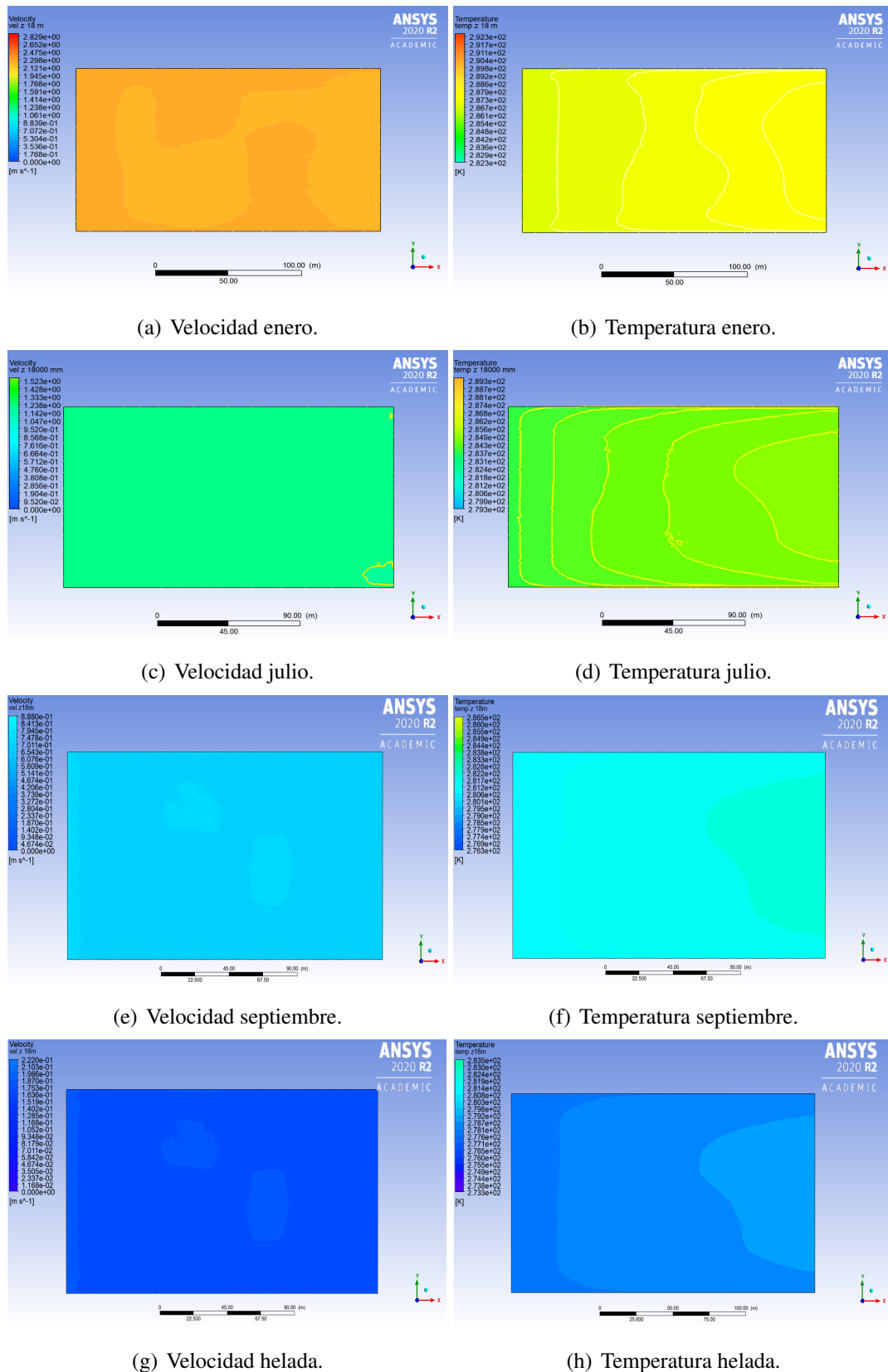
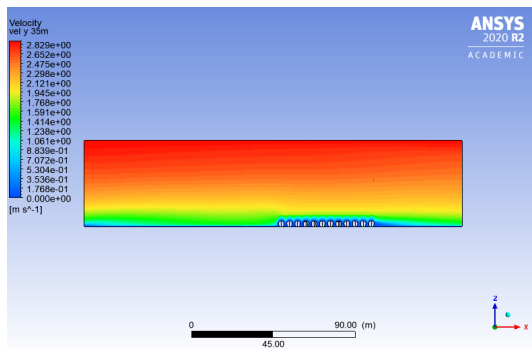
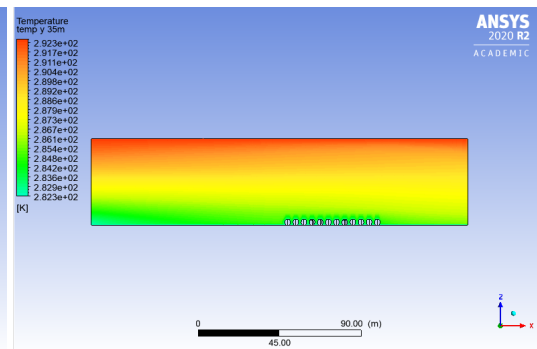


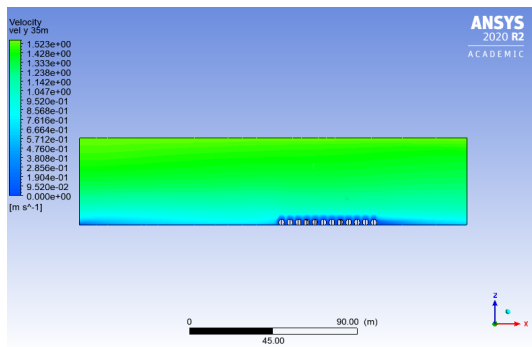
Figura 7.4: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xy a $z=18[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).



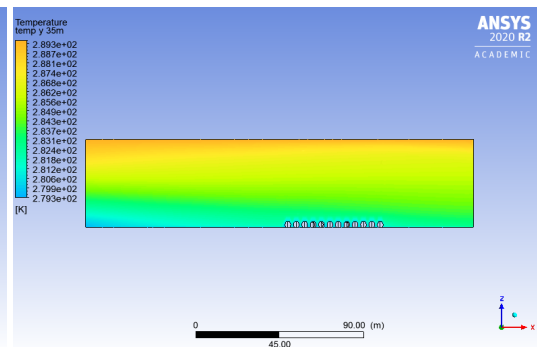
(a) Velocidad enero.



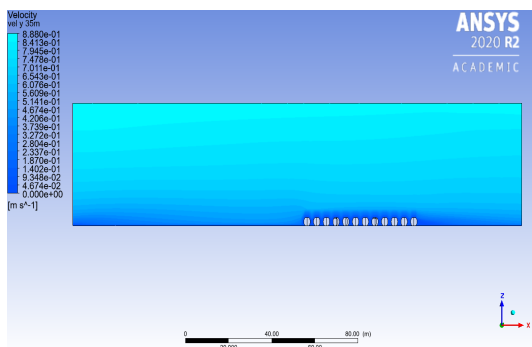
(b) Temperatura enero.



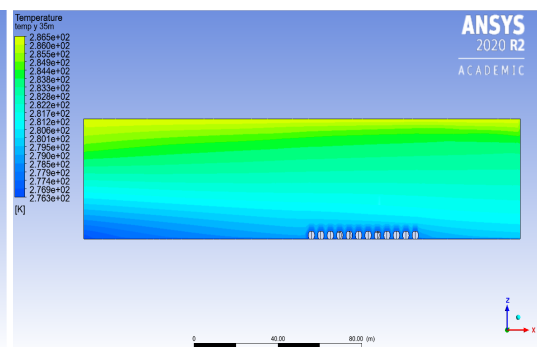
(c) Velocidad julio.



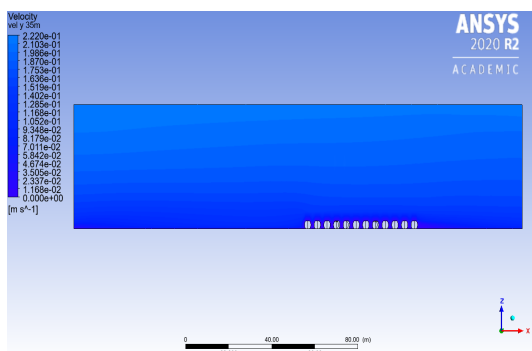
(d) Temperatura julio.



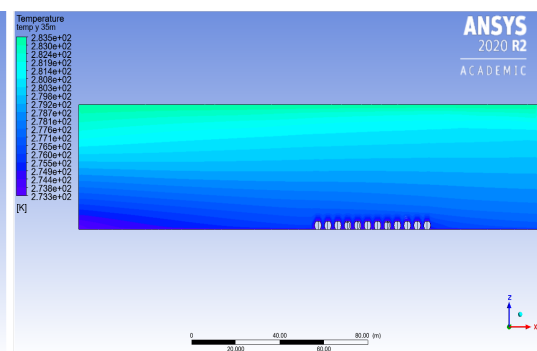
(e) Velocidad septiembre.



(f) Temperatura septiembre.

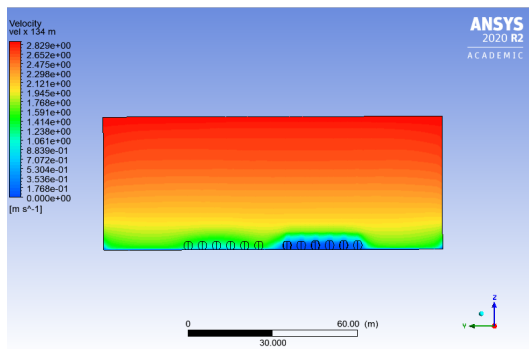


(g) Velocidad helada.

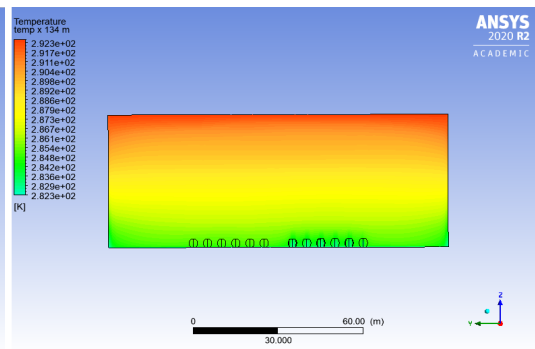


(h) Temperatura helada.

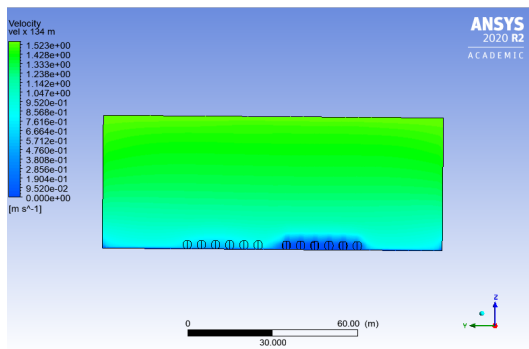
Figura 7.5: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano xz a $y=35[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero , julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).



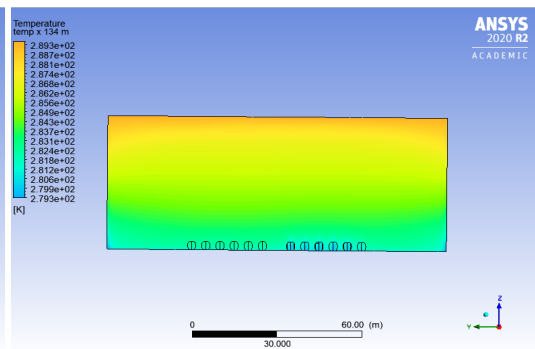
(a) Velocidad enero.



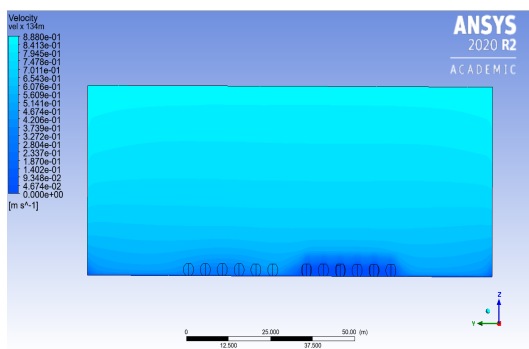
(b) Temperatura enero.



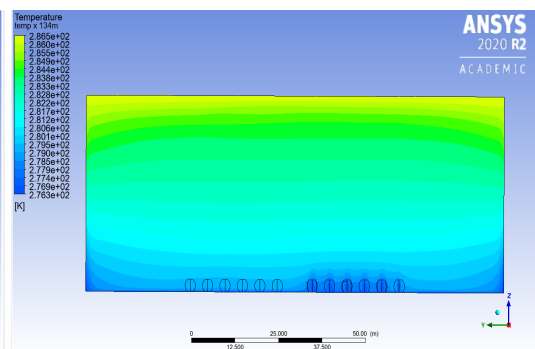
(c) Velocidad julio.



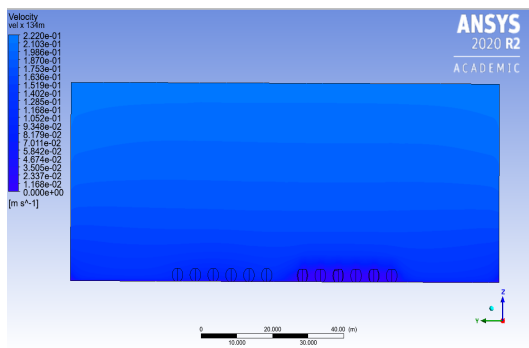
(d) Temperatura julio.



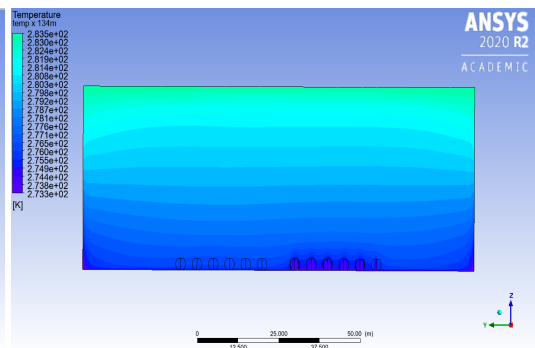
(e) Velocidad septiembre.



(f) Temperatura septiembre.



(g) Velocidad helada.



(h) Temperatura helada.

Figura 7.6: Velocidad (izquierda) y temperatura (derecha) en el plano yz a $x=134[m]$, los escenarios de potenciales heladas en enero, julio y septiembre 2020, y escenario de helada (abajo).

7.2.1. Cálculo del número de Reynolds

El estudio del régimen del viento se cuantifica mediante el Número de Reynolds compuesto de:

$$Re = \frac{\rho \cdot L \cdot v}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (7.2.1)$$

Donde Re es el Número de Reynolds, ρ la densidad del fluido, μ la viscosidad dinámica y ν la viscosidad cinemática. En tanto, v es la velocidad promedio del flujo y L el largo característico del dominio. En este caso, el largo correspondiente a la dirección horizontal x del modelo que equivale a 123,5[m] y la viscosidad cinemática ν es la del aire correspondiente a $1,74 \cdot 10^{-5} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$.

Resulta interesante estudiar el número de Reynolds en las distintas capas del cultivo, diferenciando la zona trasera de la delantera.

El patrón de comportamiento es similar a escenarios cálidos, en donde se evidencia un crecimiento del Número de Reynolds a medida se va analizando a mayores alturas en donde los mayores valores se hayan en el mes de enero con predominancia en la zona trasera del cultivo. En general, el régimen de este flujo es turbulento.

Cuadro 7.2: Número de Reynolds en las distintas capas del cultivo en distintos escenarios, diferenciando zona de cultivo Santina y Skeena.

	Enero		Julio		Septiembre		Helada	
Altura [m]	Santina	Skeena	Santina	Skeena	Santina	Skeena	Santina	Skeena
0,3	2,51E+06	4,06E+06	2,99E+06	4,42E+06	1,09E+06	1,67E+06	2,27E+05	6,81E+05
1	5,38E+06	6,34E+06	2,27E+06	4,54E+06	1,67E+06	2,75E+06	4,42E+05	1,00E+06
3,3	1,05E+07	1,11E+07	5,62E+06	6,81E+06	3,47E+06	5,50E+06	1,03E+06	1,31E+05
18	2,51E+07	2,27E+07	1,59E+07	1,59E+07	8,37E+06	1,00E+07	1,55E+05	1,91E+05

El hecho de que los flujos sean turbulentos, tiene grandes implicancias en los procesos de mezcla dentro del flujo. Tanto pequeños como medianos vórtices acarrean sustancias químicas, humedad y otros. Es por ésto que un mayor número de Reynolds se condice con una mayor homogenización en el volumen de control, las masas de aire caliente y frío se mezclan con mayor facilidad debido a la mayor turbulencia.

7.3. Comentarios Generales

Se observa una mejor homogenización del flujo en enero que en julio y septiembre, debido a que existe mayor turbulencia, que favorece la mezcla y la advección, facilitando

el movimiento de masas de aire frío y calientes. Se puede concluir que los daños por helada serán mayores en la zona delantera, pues sus temperaturas promedio son menores. Además, se espera que estos sean más intensos en el mes de Septiembre (primavera).

A lo largo del año, se mantiene una distribución de temperatura similar, estas tienen una magnitud ascendente con la altura. Implicando que las masas más frías se depositan en la zona del cultivo, mientras que las masas más calientes ascienden a la atmósfera.

Como se comenta en capítulos anteriores, los principales daños por helada se generan por el enfriamiento del tronco, la Figura 7.1 muestra el campo de temperaturas en los troncos del cultivo, mostrando claramente una segregación de las temperaturas entre las especies de cerezas, mostrando una menor magnitud en el cultivo de Santina. Por otro lado, las Figuras 7.2 y 7.3 ejemplifican las situaciones a las que se ven enfrentados los frutos de cerezo, mostrando que los de la zona delantera se ven expuestos a menores temperaturas. Ambos factores indican que los daños producto de la helada serán mayores en el cultivo de Santina.

Se puede concluir que los daños serán mayores en el cultivo Santina, pues sus temperaturas promedio son $1,5[^\circ\text{C}]$ menores. Además, se espera que estos sean más intensos en el mes de Septiembre(primavera), pues las temperaturas son $3[^\circ\text{C}]$ menores que en julio y $6[^\circ\text{C}]$ menores que en enero, para un día frío característico. Los daños al cultivo producto de la helada se intensifican porque se observa una segregación de las temperaturas entre las zonas del cultivo, mostrando una menor magnitud en el cultivo de Santina que en Skeena.

Lo anterior, prueba que es necesario hacer un análisis diferenciado para las distintas zonas de cultivo, teniendo en cuenta la dirección, velocidad y temperatura del viento.

Los resultados, muestran que la capa límite será más baja y achatada para escenarios más inestables, mientras que las velocidades aumentan para una misma altura en los escenarios estables. Dinámicamente hablando, el fenómeno se explica por la mayor advección en dirección desde el suelo no cultivado al cultivado por acción de gradientes de velocidad en las zonas desnudas. Promoviendo el desplazamiento de las masas de aire hacia la zona cultivada trasera, la advección toma un rol característico en el fenómeno de estudio.

En casos de helada, se observa que el flujo se levanta en 5.5 [m] al impactar el cultivo, generando una burbuja de separación fría, causando que el aire caliente pase por sobre el cultivo, readhiriéndose a una distancia similar al cultivo (50 [m]), aguas abajo. Esto, genera que el centro del cultivo se vea expuesto a temperaturas 5[°C] menores que el frente de ataque.

Respecto a los métodos de ventilación forzada utilizados en Viveros de Copequen para prevenir los daños del cultivo producto de la Helada, se observa que, en promedio, las máquinas de viento (sin calefactores encendidos) impulsan un aire 4[°C] más caliente que el depositado entre el cultivo. Es por esto, que **se recomienda** encender los calefactores cuando la temperatura en la torre meteorológica sea menor a 4 grados. En estas situaciones, aunque la ventilación sea efectiva el aire impulsado sería demasiado frío como para combatir los daños.

Además, se observa que las zonas centrales de los cultivos se mantienen, en promedio, 2,8[°C] más fríos que los bordes, por lo que la calefacción se debe concentrar en éstas zonas. También sería efectivo incorporar dispositivos que hagan girar las cabezas de las máquinas de viento, de esta forma se aumenta en mayor medida la advección, turbulencia, y por ende, la mezcla de masas de aire frío y caliente.

Cabe mencionar, que las condiciones de borde fueron obtenidas de simulaciones preliminares, realizadas a meso escala. Es por esto, que los perfiles toman en cuenta la interacción con la topografía de la zona, especialmente el cordón montañoso ubicado en las cercanías. Es por esto, que las recomendaciones anteriores son aplicables sólo a Viveros de Copequén. Sin embargo, es posible replicar la metodología empleada en las investigaciones para poder obtener recomendaciones para cultivos ubicados en diferentes localidades.

En la presente investigación, se incluyen escenarios del mes de enero porque existe registro de ocurrencia de heladas en meses de verano [15]. Si bien el mes característico considerado en esta investigación no es ejemplo de helada, es posible que se reúnan las condiciones para la ocurrencia de una helada radiativa, listadas en capítulos anteriores. Pudiendo haber daños por congelamiento en el fruto. Independiente de la estación, se deben tener criterios estandarizados para el encendido de máquinas de viento y calefactores, teniendo en consideración 4[°C] de aumento térmico con el uso de ventilación forzada exclusivamente (sin calefacción).

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajo Futuro

En el presente Trabajo de Título, se desarrolló una metodología que permite reproducir el fenómeno de helada radiativa mediante la anidación de una simulación a micro escala en una simulación preliminar a meso escala, ubicadas el área correspondiente al Campo Viveros de Copequen. Esto, con el fin de poder entender la dinámica y comportamiento térmico del flujo, y así realizar recomendaciones fundamentadas al mundo agricultor.

En un contexto de cambio climático, las heladas radiativas se han vuelto cada vez más comunes, haciendo que éstas se transformen en una preocupación para los agricultores de la zona. En 2013, se vieron obligados a instalar máquinas de ventilación forzada para evitar los daños por congelamiento del fruto, lo que significó una baja en la utilidad desde 276.6mil USD a 162mil USD anuales, sin embargo, éstas no tuvieron los efectos deseados.

Existen diversas marcas de máquinas de viento, las que varían según: cantidad de aspas, consumo y tipo de combustible, nivel de ruido, entre otros. Entre los proveedores existe un patrón común en la indicación de sus características operacionales: no se especifica las condiciones bajo las cuales fueron cuantificadas, esto en relación a establecer la efectividad de los equipos bajo diversas condiciones de operación, generalizando su efectividad en cuanto al radio de cobertura, hectáreas protegidas por equipo y consumo de combustible. La efectividad de los equipos va a depender tanto de los parámetros operaciones y de funcionamiento, los que se ven estrictamente condicionados a factores medioambientales, como la flotabilidad del aire, el grado y altura de la inversión térmica, velocidad y dirección de viento natural y la topografía del

sitio y el marco de plantación, pero también de características propias de la máquina como su ángulo de depresión, ángulo y frecuencia de giro, disposición y recorrido del flujo de viento y la altura de la torre.

Para poder comprender el por qué de la baja eficiencia de estas máquinas, es necesario comprender la morfología y características de diferentes especies de cerezo. Además de la helada como fenómeno atmosférico, su clasificación, factores que impactan su intensidad y su interacción con la topografía local. Por otro lado, se deben conocer conceptos termodinámicos de la atmósfera, estabilidad térmica y turbulencia, para poder aplicar las ecuaciones gobernantes de mecánica de fluidos pertinentes al fenómeno.

La simulación numérica de el fenómeno de helada radiativa en la zona de estudio, se encuentra condicionada por el comportamiento del flujo de viento estratificado en una atmósfera estáticamente estable a micro escala, utilizando las condiciones de borde establecidas por investigaciones meso escala preliminares y datos meteorológicos disponibles en el portal de la DGAC, fue posible realizar la modelación micro escala correspondiente al campo de Viveros Copequen. Para simular el cultivo, se debió establecer un largo de rugosidad aerodinámica equivalente, que considerara el estado fenológico de la plantación en los meses simulados, además de encontrar una geometría característica para cada especie de cereza.

La simulación fue llevada a cabo en una malla computacional de alta resolución, la cual alcanzó una independencia de malla. Cada simulación tardó en promedio 90 [min], alcanzando convergencia de residuales.

El método utilizado para simular el comportamiento del flujo a micro escala sobre el cultivo, corresponde RANS SST, de volúmenes finitos, considerando el aire seco como un fluido newtoniano incompresible, debido a las bajas velocidades alcanzadas, sin cambios de fase del vapor de agua contenida y bajo una atmósfera hidrostáticamente balanceada, considerando un régimen turbulento.

Respecto a la metodología establecida, en el caso del perfil de velocidad, corresponde a un modelo logarítmico generado por la simulación meso escala de la zona, que se relaciona con las características de los primeros 50 metros de la capa límite atmosférica estáticamente neutra. Para su implementación, fue necesario conocer la longitud de Obukhov y el flujo de calor sensible superficial.

Para el perfil de temperatura, se tuvo en cuenta la característica de estabilidad estática de la atmósfera, utilizando la temperatura potencial. Tanto los perfiles de velocidad como de temperatura, se ajustaron según las características de días fríos de los meses de enero, julio, septiembre y día de helada característicos, para estudiar distintos escenarios. Para eso, se aplicaron los gradientes térmicos apropiados, además de las variaciones de densidad dependiendo de la estratificación térmica.

En el comportamiento de la helada, se puede concluir que los daños serán mayores en el cultivo Santina, pues sus temperaturas promedio son $1,5^{\circ}\text{C}$ menores. Además, se espera que estos sean más intensos en el mes de Septiembre(primavera), pues las temperaturas son 3°C menores que en julio y 6°C menores que en enero, para un día frío característico. Los daños al cultivo producto de la helada se intensifican porque se observa una segregación de las temperaturas entre las zonas del cultivo, mostrando una menor magnitud en el cultivo de Santina que en Skeena.

En casos de helada, se observa que el flujo se levanta en 5.5 [m] al impactar el cultivo, generando una burbuja de separación fría, causando que el aire caliente pase por sobre el cultivo, readhiriéndose a una distancia similar al cultivo (50 [m]), aguas abajo. Esto, genera que el centro del cultivo se vea expuesto a temperaturas $2,8^{\circ}\text{C}$ menores que el frente de ataque.

Respecto a los métodos de ventilación forzada utilizados en Viveros de Copequen para prevenir los daños del cultivo producto de la Helada, se observa que, en promedio, las máquinas de viento (sin calefactores encendidos) impulsan un aire 4°C más caliente que el depositado entre el cultivo. Es por esto, que **se recomienda** encender los calefactores cuando la temperatura en la torre meteorológica sea menor a 4 grados. En estas situaciones, aunque la ventilación sea efectiva el aire impulsado sería demasiado frío como para combatir los daños.

Cabe mencionar, que las condiciones de borde fueron obtenidas de simulaciones preliminares, realizadas a meso escala. Es por esto, que los perfiles toman en cuenta la interacción con la topografía de la zona, especialmente el cordón montañoso ubicado en las cercanías. Es por esto, que las recomendaciones anteriores son aplicables sólo a Viveros de Copequén. Sin embargo, es posible replicar la metodología empleada en las investigaciones para poder obtener recomendaciones para cultivos ubicados en diferentes

localidades.

En el futuro, resulta interesante simular la interacción de las máquinas de viento con el cultivo de cerezos, para poder evidenciar su efecto al combatir los daños en los frutos producto de la helada al comparar los resultados con los presentados en la investigación. Más adelante, se pueden plantear modificaciones a las máquinas mismas, respecto de su ubicación de instalación, cantidad y construcción, para así maximizar los resultados de uso de equipos de protección de helada.

Bibliografía

- [1] Portal de servicios climáticos - dirección meteorológica de Chile. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>.
- [2] Great american adaptation road trip. 2013. URL <https://adaptationstories.com/2013/08/02/colorado-fruit-growers-harness-wind-water-and-fire/-to-save-harvest/>.
- [3] Estados fenológicos del cerezo. 2015. URL tecnologiagricola.es.
- [4] Frutales y requerimiento climático: “el cerezo”. 2016. URL climafrutal.wordpress.com.
- [5] Variedades de cerezos viveros copequen. 2020. URL viveroscopequen.cl.
- [6] W Abtew, J M Gregory, y J Borrelli. Wind profile: estimation of displacement height and aerodynamic roughness. *Transactions of the ASAE*, 32(2):521–0527, 1989. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.31034>.
- [7] RG Allen, LS Pereira, D Raes, y M Smith. Chapter 2—fao penman-monteith equation: Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. *Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome*, 1998.
- [8] BN Bailey y R Stoll. Turbulence in sparse, organized vegetative canopies: a large-eddy simulation study. *Boundary-layer meteorology*, 147(3):369–400, 2013. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-012-9796-4>.
- [9] V Beyá-Marshall, J Herrera, F Santibáñez, y T Fichet. Microclimate modification under the effect of stationary and portable wind machines. *Agricultural and Forest Meteorology*, 269:351–363, 2019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.042>.

- [10] JA Businger, JC Wyngaard, Y Izumi, y EF Bradley. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the atmospheric Sciences*, 28(2):181–189, 1971. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0181:FPRITA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0181:FPRITA>2.0.CO;2).
- [11] M Carrasco-Benavides, M Mora, G Maldonado, J Olguín-Cáceres, E von Bennewitz, S Ortega-Farías, J Gajardo, y S Fuentes. Assessment of an automated digital method to estimate leaf area index (lai) in cherry trees. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 44(4):247–261, 2016.
- [12] A Chahine, S Dupont, C Sinfort, y Y Brunet. Wind-flow dynamics over a vineyard. *Boundary-layer meteorology*, 151(3):557–577, 2014. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-013-9900-4>.
- [13] P González Colville. Comportamiento de las horas-frío, grados-día, heladas y precipitaciones en los agroecosistemas de la región del maule durante los eventos el niño 1997 y la niña 1998-1999. *CONA*.
- [14] J Costa, C Pereira Lopes da, et al. Atmospheric flow over forested and non-forested complex terrain. 2007.
- [15] Ministerio de Agricultura de Chile. Boletines agroclimáticos. agosto y septiembre, 2017, 2018 y 2019.
- [16] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Cambio climático, impacto en la agricultura heladas y sequías. 2013.
- [17] ME Dellinger. Formación y sistemas de conducción del cerezo dulce. *Boletín INIA*, 1(247).
- [18] CJ Desmond y S Watson. A study of stability effects in forested terrain. En *Journal of Physics: Conference Series*, tomo 555, pág. 012027. IOP Publishing, 2014.
- [19] Sección Climatología Dirección Meteorológica de Chile, Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada. Boletín climatológico enero 2019. 57, 2019.
- [20] S Dupont y Y Brunet. Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agricultural and forest meteorology*, 148(6-7):976–990, 2008. doi:<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.01.014>.
- [21] KH Fisher. Reducing cold injury to grapes through the use of wind machines. 2009.

- [22] Portal Frutícola. Arándanos y cerezos entre los frutales más afectados por las heladas en Chile. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2013/09/25/arandanos-y-cerezos-entre-los-frutales-mas-afectados-por-las-heladas-en-chile/>, 2018.
- [23] G. Gambetta y A. Flores. Tesis de investigación: “simulación computacional flujo de aire en condiciones de helada radiativa sobre terreno complejo a mesoescala “. *Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), Valparaíso, Chile*, 2019.
- [24] JR Garratt. Review of drag coefficients over oceans and continents. *Monthly weather review*, 105(7):915–929, 1977. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105<0915:RODCOO>2.0.CO;2).
- [25] Y Hu, EA Asante, Y Lu, A Mahmood, NA Buttar, y S Yuan. Review of air disturbance technology for plant frost protection. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(3):21–28, 2018. doi:<https://doi.org/10.25165/j.ijabe>.
- [26] Y Hu, P Li, X Wang, y X Zhang. Control method and apparatus of wind machine for plant frost protection. 2014. US Patent 8,701,341.
- [27] J Huang, M Cassiani, y JD Albertson. The effects of vegetation density on coherent turbulent structures within the canopy sublayer: a large-eddy simulation study. *Boundary-layer meteorology*, 133(2):253–275, 2009. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-009-9423-1>.
- [28] J Inzunza. Apunte de meteorología descriptiva. *Universidad de Concepción, Departamento de Geofísica*, 2007.
- [29] GG Katul, L Mahrt, D Poggi, y C Sanz. One-and two-equation models for canopy turbulence. *Boundary-layer meteorology*, 113(1):81–109, 2004. doi:<https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000037333.48760.e5>.
- [30] MS Kim y BH Kwon. Estimation of sensible heat flux and atmospheric boundary layer height using an unmanned aerial vehicle. *Atmosphere*, 10(7):363, 2019. doi:<https://doi.org/10.3390/atmos10070363>.
- [31] J Kleissl, V Kumar, C Meneveau, y MB Parlange. Numerical study of dynamic smagorinsky models in large-eddy simulation of the atmospheric boundary layer:

- Validation in stable and unstable conditions. *Water resources research*, 42(6), 2006. doi:<https://doi.org/10.1029/2005WR004685>.
- [32] A Kormas, JM Prospathopoulos, PK Chaviaropoulos, y K Yakinthos. Wind flow simulation over forested areas using a 3d rans solver with a tree-scale approach. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 155:149–158, 2016. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.06.003>.
- [33] B Lalić y D Mihailovic. An empirical elation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 2004. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0641:AERDLD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0641:AERDLD>2.0.CO;2).
- [34] J Launiainen y T Vihma. Derivation of turbulent surface fluxes—an iterative flux-profile method allowing arbitrary observing heights. *Environmental Software*, 5(3):113–124, 1990. doi:[https://doi.org/10.1016/0266-9838\(90\)90021](https://doi.org/10.1016/0266-9838(90)90021).
- [35] L Lu, S Liu, Z Xu, K Yang, X Cai, L Jia, y J Wang. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces. *Advances in atmospheric sciences*, 26(1):180–190, 2009. doi:<https://doi.org/10.1007/s00376-009-0180-3>.
- [36] L Guadalupe M Ramírez, OA Fuentes-Marilles, y F García-Jiménez. *Heladas*. Sistema Nacional de Protección Civil, 2012.
- [37] L Martínez, A Ibacache, y L Rojas. Efecto de las heladas en la agricultura. *Boletín INIA*, (165), 2007.
- [38] S McCormick, C Montavon, I Jones, C Staples, y Y Sinai. Atmospheric boundary layer-boundary layer conditions and profiles. *WindModeller Manuals*. ANSYS, 2012. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-004-1425-4>.
- [39] FR Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8):1598–1605, 1994. doi:<https://doi.org/10.2514/3.12149>.
- [40] AS Monin y AM Obukhov. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *Tr. Geofiz. Inst., Akad. Nauk SSSR*, 24(151):163–187, 1954.
- [41] Organización Meteorológica Mundial. Instrumentos y métodos de observación meteorológicos. *Secretaría de la O.M.M.*, 5(8), 1990.

- [42] CB Meruane Naranjo. El efecto del viento puelche sobre la hidrodinámica y calidad de aguas del lago villarica. 2005.
- [43] B Nebenführ y L Davidson. Large-eddy simulation study of thermally stratified canopy flow. *Boundary-layer meteorology*, 156(2):253–276, 2015. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.270>.
- [44] MD Novak, JS Warland, AL Orchansky, R Ketler, y S Green. Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. part i: uniformly thinned stands. *Boundary-Layer Meteorology*, 95(3):457–495, 2000. doi:<https://doi.org/10.1023/A:1002693625637>.
- [45] Estudio ODEPA. Efecto heladas de septiembre en frutales y hortalizas entre la región de coquimbo y la del maule. *Estudio encargado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (Odepa) del Ministerio de Agricultura*, 2013.
- [46] MR Raupach, JJ Finnigan, y Y Brunet. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. En *Boundary-layer meteorology 25th anniversary volume, 1970–1995*, págs. 351–382. Springer, 1996. doi:<https://doi.org/10.1007/BF00120941>.
- [47] F Santibáñez y H Merlet. Los regímenes de heladas en la zona central de chile. *Aconex (Santiago)(16)*, págs. 20–27, 1987.
- [48] RH Shaw y EG Patton. Canopy element influences on resolved-and subgrid-scale energy within a large-eddy simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 115(1-2):5–17, 2003. doi:[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00165-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00165-X).
- [49] RH Shaw y AR Pereira. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. *Agricultural Meteorology*, 26(1):51–65, 1982. doi:[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90057-7).
- [50] RH Shaw y U Schumann. Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 61(1-2):47–64, 1992. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02033994>.
- [51] RL Snyder, JP de Melo Abreu, y S Matulich. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. *Serie FAO sobre el Medioambiente y la Gestión de los Recursos Naturales*, 1(10), 2010.

- [52] M Soma, F Pimont, S Durrieu, y JL Dupuy. Enhanced measurements of leaf area density with t-lidar: Evaluating and calibrating the effects of vegetation heterogeneity and scanner properties. *Remote Sensing*, 10(10):1580, 2018. doi:<https://doi.org/10.3390/rs10101580>.
- [53] R Stoll y F Porté-Agel. Large-eddy simulation of the stable atmospheric boundary layer using dynamic models with different averaging schemes. *Boundary-layer meteorology*, 126(1):1–28, 2008. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-007-9207-4>.
- [54] L Stowhas. Fundamentos de hidrología aplicada. *Valparaíso, Chile, Editorial USM*, 2016.
- [55] R Stull. *Meteorology for scientists and engineers*. Brooks/Cole, 2000.
- [56] R Stull. *An introduction to boundary layer meteorology*, tomo 13. Springer Science & Business Media, 2012.
- [57] U Svensson y K Häggkvist. A two-equation turbulence model for canopy flows. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 35:201–211, 1990. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-013-9850-x>.
- [58] División Agrícola Tecnipak. Ficha técnica: “calefactor central 1164 d y 582 d”, marca orchard rite. *Santiago, Chile*, 2017.
- [59] División Agrícola Tecnipak. Ficha técnica: “máquinas de viento 2600 g y 2700 d”, marca: Orchard rite. *Santiago, Chile*, 2017.
- [60] IALE Tecnología. Estudio de vigilancia tecnológica sistemas de control y manejo de heladas para el sector agrícola nacional. 2017.
- [61] AS Thom. Momentum absorption by vegetation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 97(414):414–428, 1971. doi:<https://doi.org/10.1002/qj.49709741404>.
- [62] Tow y Bow USA. Eportable wind machines. *Patente*, (610277).
- [63] FM Turrell. The science and technology of frost protection. *The citrus industry*, 3:338–446, 1973.
- [64] H Yazdanpanah y CJ Stigter. Selective inverted sink efficiency for spring frost protection in almond orchards northwest of isfahan, iran. *Theoretical*

- and Applied Climatology*, 105(1-2):27–35, 2011. doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-010-0367-7>.
- [65] S S Zilitinkevich, I Mammarella, AA Baklanov, y SM Joffre. The effect of stratification on the aerodynamic roughness length and displacement height. *Boundary-layer meteorology*, 129(2):179–190, 2008. doi:<https://doi.org/10.1007/s10546-008-9307-9>.