

Propuesta metodológica para el diseño de un sistema de alerta de heladas en base a datos satelitales, de superficie y modelados.

Por *Felipe Albornoz Muñoz*

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Diciembre, 2017

©IG - CONAE/UNC 2015

©FaMAF - UNC 2015

DIRECTOR

Dr. Guillermo Aguirre Varela

Universidad Nacional de Córdoba.

Córdoba, Argentina.

CO-DIRECTORA

M. Cs. Romina Solorza

Instituto Mario Gulich - CONAE.

Córdoba, Argentina.

ASESOR CIENTÍFICO

M. Cs. Andrés Lighezzolo

Instituto Mario Gulich - CONAE.

Córdoba, Argentina.



ESTA OBRA ESTÁ BAJO UNA LICENCIA CREATIVE COMMONS ATRIBUCIÓN-NOCOMERCIAL-COMPARTIRIGUAL 4.0 INTERNACIONAL.

Dedicado

A mis padres, hermanos, sobrinos, a mi familia por estar siempre presentes.

A todos aquellos que supieron comprender el esquivo y nulo tiempo durante esta hermosa etapa de la vida.

Especialmente a Elena, mi compañera de vida, de aventuras, de locuras y estudios, por ser esa fuente de energía constante en el día a día, muchas gracias amor.

Agradecimientos

Los más sinceros agradecimientos a las autoridades de CIREN por haber depositado su confianza en mi persona, a don Eugenio Aguiló y Ricardo Cabezas por haberme ofrecido la oportunidad de seguir creciendo como profesional y persona de bien. De igual manera, agradecer al actual director ejecutivo de CIREN, el señor Juan Pablo López, por depositar su más absoluta confianza y nunca cuestionar nuestros principios y dedicación profesional. A Sergio Maldonado, por confiar de la misma manera una vez reingresado a la institución, muchas gracias. A Esteban Vojković, por otorgar siempre su ayuda y consejos en los momentos difíciles, brindando siempre una sonrisa y sus sabias palabras de manera totalmente desinteresada y honesta; a los colegas de la subgerencia de Geomática.

A Felipe Guzmán, Jorge Valdivia y Maximiliano por ofrecerme siempre su ayuda en materia de códigos en Linux, Python y Latex. A Joan Peña, por su ayuda y soporte en la búsqueda de bibliografía en el centro de documentación.

A Octavio Pardo, director de la Escuela Agrícola de San Felipe del Aconcagua, por facilitarme desinteresadamente los datos de la estación meteorológica para poder realizar las validaciones.

A mis amigos Antonio Padovano y Abraham Aguilar, por entregar siempre una alegría y su buena compañía en las heladas tierras de Bolzano.

A Claudia Notarnicola, por brindarnos la oportunidad de hacer nuestra pasantía en el Instituto Eurac e insentivar el siempre ir un paso adelantado de los demás.

A mis compañeros de maestría, quiénes tuvieron que aguantar mis bromas, genio y mi música.

A los profesores Marcelo, Mario, Camilo y Gabriel, por entregarme siempre las mejores herramientas profesionales y consejos de vida durante la estadía, por intentar sacar siempre lo mejor de cada uno de nosotros, muchas gracias!!

A Pamela, Facundo, Diana y Andrés Solarte...gracias muchachos, pueden confiar y contar conmigo para lo que necesiten, los quiero mucho!!

A Carmencita, Antonio, Alicia y Manuel por brindarnos siempre un cariño y calor de hogar único durante estos dos años....muchas gracias!!

A mi director, codirectora y asesor técnico, señores Guillermo Aguirre, Romina Solorza y Andrés Lighezzolo, muchísimas gracias por todo el aguante y dedicación brindada durante esta etapa y mi estadía en la maestría.

A todos los profesores y autoridades que confiaron en mí, tanto de CONAE como del Instituto Mario Gulich, muchas gracias.

Finalmente, agradecer a la República de Argentina por abrirme sus puertas y acogerme como un hijo más durante mi estadía completa, muchísimas gracias.

Resumen

Como problemática mundial y no ajeno para nuestro país, tanto los agricultores y sus cosechas son posicionados estratégicamente, tal que su producción, no se vea afectada por condiciones de temperaturas extremas, ya ocurra esto debido a su intensidad, a lugares poco frecuentes, a épocas anormales de ocurrencia, entre otras. Estas razones, hacen que sea importante el estudiar el fenómeno de las heladas, buscando siempre la protección de ambos actores.

Las heladas, hoy en día, es uno de los principales problemas a investigar como condición meteorológica adversa, dado a que éstas generan un impacto negativo a la agricultura nacional en general.

En el desarrollo de este proyecto, se consideró como base teórica la experiencia de la doctora Claudia Notarnicola, para lo cual, se utilizaron imágenes del satélite Aqua/MODIS a través de su producto *MYD11A1-V5* y el algoritmo implementado para la determinación de los mapas históricos de ocurrencia de heladas, es aquel desarrollado por *Robin Pouteau*.

Posteriormente, se estableció la búsqueda de correlación entre las temperaturas de superficie obtenidas por el sensor MODIS y las temperaturas del aire registradas de las estaciones meteorológicas mediante regresiones lineales simples y múltiples, dentro de la provincia de San Felipe del Aconcagua, región de Valparaíso - Chile.

Como resultado esperado, el conocer algún tipo de dato e información que permita anticiparse a la ocurrencia de heladas, resulta extremadamente relevante, ya que el conocimiento de dicha condición tendrá como finalidad el poder ejecutar alguna medida de mitigación por parte del agricultor (*prevención o protección*) y así evitar el inminente daño a toda una producción o parte de esta a causa de una temperatura mínima extrema, por lo cual, el conocer y tener un estimativo acertado de la variable *temperatura*, alcanza una significativa preponderancia y hace sustentable en el tiempo dicho estudio.

Los meses en que se concentra esta investigación, va desde mayo a octubre (meses en los cuales puede producirse una helada otoñal, invernal o primaveral), siendo la otoñal-temprana y primaveral-tardía, las que generan mayor daño dado la ocurrencia de las *heladas negras*, la cual daña a la planta con resultados irreversibles, debido a que esta se encuentra en pleno proceso vegetativo.

Palabras claves: sensores remotos, Aqua/MODIS, ocurrencia de heladas, correlaciones, regresiones lineales, información.

Abstract

As a global problem, included our country, both farmers and their crops are strategically positioned, so that their production is not affected by extreme temperature conditions, either this situation happens due to its intensity, or in not expected places, or abnormal times of occurrence, among others. These reasons make it important to study the phenomenon of frost, always seeking the protection of both actors.

Nowadays frosts events are one of the main problems to be considered as an adverse meteorological condition that generate a negative impact on national agriculture.

To develop this project, the generated experience of Dr. Claudia Notarnicola, considered as a theoretical basis, using images of the Aqua / MODIS satellite through its product MYD11A1-V5 and the algorithm developed by Robin Pouteau for the determination of historical maps of occurrence of frost areas.

Subsequently, the correlation between the surface temperatures (obtained by the sensor) and the air temperatures (recorded by the meteorological stations) through simple and multiple linear regressions, within the province of San Felipe del Aconcagua, Valparaíso province of Chile, was established.

As expected result, knowing in advance some type of data and information that allow us to anticipate the occurrence of frosts is extremely important. In this way, the farmer could implement and execute some measure of mitigation (prevention or protection), and thus, avoiding the imminent damage to a whole production or part of the crops, due to an extreme minimum temperature. Knowing and forecasting an accurate estimator of the changes in temperature give a significant preponderant factor and makes the study sustainable.

The study covers the months from May to October (months in which an autumnal, winter or spring frost can occur) being the autumnal-early and spring-late, which generate greater damage given the occurrence of the black frost, which damages the plant with irreversible results, because it is in full vegetative process.

Keywords: remote sensing, Aqua/MODIS, frost occurrence, correlations, linear regressions, information.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción General	1
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivo General	4
1.3. Objetivos Específicos	4
1.4. Estructura de la Tesis	5
2. Marco Teórico	6
2.1. La congelación a nivel celular	8
2.1.1. Formación de hielo	8
2.1.2. Cristalización del hielo	8
2.1.3. Conductividad térmica	9
2.1.4. Velocidad de congelación	9
2.2. Factores que influyen sobre la intensidad de una helada	10
2.3. Clasificación de las heladas	11
2.3.1. Época de ocurrencia	12
2.3.2. Proceso físico	13
2.3.3. Efectos visuales	14
2.4. Efectos de las heladas en los cultivos	15

2.5.	Estrategias en el control de heladas	16
2.5.1.	Controles pasivos	17
2.5.2.	Controles activos	18
2.6.	Tipos de heladas en Chile	19
2.6.1.	Helada de advección	19
2.6.2.	Helada de radiación	19
2.6.2.1.	Daños producidos por heladas a diversos cultivos	20
2.6.2.2.	Nivel de daño que causa en las especies frutales	21
2.7.	Estado del Arte	22
2.7.1.	Land Surface Temperature - LST	22
2.7.1.1.	Temperatura de la Superficie capturada por sensores	23
2.7.2.	El uso de la Teledetección en las heladas	24
3.	Área de Estudio	29
3.1.	Antecedentes Generales	29
3.2.	Perfil Ambiental	32
3.2.1.	La Cuenca del río Aconcagua	35
4.	Materiales y Métodos	39
4.1.	Las Imágenes Ópticas	39
4.1.1.	Tipos de Resolución	42
4.2.	El Satélite Aqua, sensor MODIS	44
4.2.1.	Datos y Productos	48
4.3.	Metodología empleada	52
4.3.1.	Antecedentes Generales	52
4.3.2.	Especificaciones técnicas del modelo	53
4.3.3.	Conclusiones del Capítulo	61
5.	Validación de datos	62

5.1. Validación de imágenes MODIS	62
5.2. Validación de datos meteorológicos	64
5.3. Validación de datos MYD11A1-V5	68
5.3.1. Análisis de variables mediante regresión lineal simple	70
5.3.2. Conclusiones del Capítulo	94
6. Integración de variables meteorológicas	95
6.1. Análisis Multivariable	95
6.2. Descripción de nuevas variables	96
6.2.1. Temperatura	96
6.2.2. Humedad	96
6.2.3. Presión Atmosférica	96
6.2.4. Viento	97
6.2.5. Precipitación	97
6.3. Regresión lineal múltiple	98
6.3.1. Estimación del modelo de regresión lineal	99
6.4. Integrando las nuevas variables	100
6.4.1. Depuración del modelo	103
6.4.2. Conclusiones del Capítulo	114
7. Predicción a futuro	115
7.1. El origen de los modelos climáticos	116
7.1.1. Modelos de Predicción	117
7.1.1.1. Evaluación de modelos climáticos	119
7.1.1.2. La meteorología a nivel local	119
7.1.2. El modelo WRF	121
7.1.2.1. Generación de productos con WRF	122
7.1.3. Conclusiones del Capítulo	126

ÍNDICE GENERAL

8. Conclusiones y futuros lineamientos	127
I Anexo	129
Bibliografía	135

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Factores que influyen sobre la intensidad de una helada	10
2.2. Clasificación de las heladas	11
2.3. Daño producido por una helada negra	14
2.4. Efectos de las heladas en los cultivos	15
2.5. Formas de transferencia de calor	16
2.6. Diagrama de controles pasivos	17
2.7. Diagrama de controles activos	18
2.8. Frutales afectados por heladas	20
2.9. Frutales de carozo afectados por una helada	21
2.10. Radiómetro en banda L	25
2.11. Mapa de suelo congelado al norte de Finlandia	25
2.12. Representación de una imagen Aqua MODIS LST sobre el valle de Yarra, Australia .	26
2.13. Categorización de riesgo de heladas y frecuencia de ocurrencia de temperaturas inferiores a 0 °C	27
3.1. Ubicación geográfica de la región de Valparaíso - Chile	30
3.2. División Político-Administrativa del área de estudio	31
3.3. Ciclo geomorfológico evolutivo	32
3.4. Carta sinóptica de un sistema frontal	33

ÍNDICE DE FIGURAS

3.5. Identificación de formas de terrazas dentro de la cuenca del Aconcagua	34
3.6. Perfil topográfico de la subcuenca del Aconcagua, región de Valparaíso	35
3.7. Perfil de temperatura de superficie, región de Valparaíso	36
3.8. Sector superior de la cuenca del Aconcagua	38
4.1. El espectro electromagnético	40
4.2. Longitudes de onda de las siete primeras bandas del sensor MODIS	41
4.3. Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo reflejado del espectro electromagnético	41
4.4. Distintas resoluciones espaciales	42
4.5. Diferencias entre una banda pancromática y otra multiespectral	43
4.6. Cobertura diaria del satélite Aqua/MODIS	44
4.7. Estructura del sensor MODIS	46
4.8. Proyección sinusoidal empleada para la distribución de datos MODIS	48
4.9. Producto MYD11A1-V5, proyección Sinusoidal	49
4.10. Modelo de probabilidad de ocurrencia de helada	53
4.11. Metodología de procesos local	54
4.12. Mapa de temperatura superficial, producto MYD11A1-V5	55
4.13. Mapa de probabilidad de ocurrencia de helada, mayo 2010	56
4.14. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo mayo 2010-2016	58
4.15. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo junio 2010-2016	58
4.16. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo julio 2010-2016	58
4.17. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo agosto 2010-2016	58
4.18. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo septiembre 2010-2016	58
4.19. Mapa de ocurrencia de heladas, periodo octubre 2010-2016	58
4.20. Probabilidad ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016	59
4.21. Ocurrencia histórica de heladas mensuales, periodo 2004-2014	60
4.22. Probabilidad ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016	60

ÍNDICE DE FIGURAS

4.23. Ocurrencia de heladas anual, periodo 2010-2016	61
5.1. Distribución de sitios de validación EOS	63
5.2. Estaciones meteorológicas en estudio	69
5.3. Distribución de temperaturas en la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe	70
5.4. Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	71
5.5. Identificación de Valores Atípicos	74
5.6. Distribución de Residuos Estandarizados	74
5.7. Cuantil normal estándar aplicado a la Temperatura de Superficie	75
5.8. Cuantil normal estándar aplicado a la Temperatura del Aire	75
5.9. Prueba de Normalidad - Residuos Atípicos	75
5.10. Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple sin puntos atípicos	76
5.11. Distribución de Residuos Estandarizados	78
5.12. Prueba de Normalidad - Residuos Atípicos	78
5.13. Resultado de las Temperaturas Calibradas al utilizar regresión lineal simple	79
5.14. Temperatura de Superficie v/s Temperatura de Superficie Calibrada, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	80
5.15. Temperatura del Aire v/s Temperatura de Superficie Calibrada, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe	81
5.16. Promedio de temperaturas mensuales para la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, año 2011	81
5.17. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de mayo 2011 - 2015	82
5.18. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de junio 2011 - 2015	82
5.19. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de julio 2011 - 2015	83
5.20. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de agosto 2011 - 2015	83
5.21. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de septiembre 2011 - 2015	84
5.22. Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de octubre 2011 - 2015	84

ÍNDICE DE FIGURAS

5.23. Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple, estación meteorológica de la comuna de Los Andes	85
5.24. Temperatura del Aire v/s Temperatura de Superficie Calibrada, estación meteorológica de la comuna de Los Andes	87
5.25. Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple, estación meteorológica de La Cruz, mayo 2011	88
5.26. Temperatura del Aire v/s Temperatura Superficie Calibrada, estación meteorológica de la comuna de La Cruz	90
5.27. Temperatura de Superficie para el mes de octubre año 2015	93
5.28. Temperatura de Superficie Calibrada para el mes de octubre año 2015	93
6.1. Comparación entre las Temperaturas de Superficie obtenidas a través de distintos métodos de regresiones lineales múltiples	105
6.2. Gráfico de Temperatura Superficie v/s Temperatura de Superficie Calibrada para la estación meteorológica de Los Andes, mayo 2011	107
6.3. Gráfico de Temperatura de Superficie v/s Temperatura de Superficie Calibrada para la estación meteorológica de La Cruz, mayo 2011	109
6.4. Distribución de estaciones meteorológicas, región de Valparaíso	110
7.1. Estimación de Temperatura °C al utilizar imágenes del satélite NOAA 18, 02 junio 2012	118
7.2. Temperaturas obtenidas a través del modelo WRF para 48 horas, 17-18 de julio 2013	122
7.3. Temperaturas obtenidas a través del modelo WRF para 48 horas 18-19 de julio 2013 .	122
8.1. Sitio de descarga de imágenes MODIS	130

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Conjunto de datos para el producto MYD11A1 V5	50
4.2. Resultados estadísticos, mapas de ocurrencia de heladas	57
4.3. Probabilidad ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016	57
5.1. Límites físicos de diferentes variables meteorológicas	65
5.2. Ubicación de la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe	70
5.3. Temperaturas registradas en la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	70
5.4. Categorización para los valores de R^2	72
5.5. Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas	72
5.6. Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova	73
5.7. Valor puesto en observación aplicada la prueba de Residuos Atípicos	74
5.8. Puntos Influyentes, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe	74
5.9. Temperaturas registradas en la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe eliminada una observación, mayo 2011	76
5.10. Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas	77
5.11. Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova	77
5.12. Valores estadísticos comparativos entre datos con y sin presencia de Puntos Atípicos	79

ÍNDICE DE TABLAS

5.13. Comparación entre las Temperaturas del Aire y de Superficie Calibrada, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	81
5.14. Ubicación de la estación meteorológica de la comuna de Los Andes	85
5.15. Temperaturas registradas en la estación meteorológica de la comuna de Los Andes	85
5.16. Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas	86
5.17. Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova	86
5.18. Comparación entre las Temperaturas del Aire y Temperatura de Superficie Calibrada, comuna de Los Andes, mayo 2011	87
5.19. Ubicación de la estación meteorológica de la comuna de La Cruz	88
5.20. Temperaturas registradas en la estación meteorológica de la comuna de La Cruz, mayo 2011	88
5.21. Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas	89
5.22. Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova	89
5.23. Temperatura del Aire v/s Temperatura de Superficie Calibrada, estación meteorológica de la comuna de La Cruz	90
5.24. Resumen de número y probabilidad de heladas año 2011	91
5.25. Resumen de número y probabilidad de heladas año 2012	91
5.26. Resumen de número y probabilidad de heladas año 2013	91
5.27. Resumen de número y probabilidad de heladas año 2014	92
5.28. Resumen de número y probabilidad de heladas año 2015	92
6.1. Diversas variables utilizadas para una regresión lineal múltiple, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	100
6.2. Resumen estadístico de la regresión	100
6.3. Análisis del modelo de regresión	101
6.4. Diversas variables utilizadas para una regresión lineal múltiple, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, mayo 2011	101
6.5. Análisis del modelo de regresión	102
6.6. Resumen estadístico de la regresión	102
6.7. Análisis del modelo de regresión, al utilizar el método paso-paso-atrás	103

ÍNDICE DE TABLAS

6.8. Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova	104
6.9. Resumen de la regresión lineal múltiple al utilizar el método paso paso-atrás, mayo 2011	104
6.10. Temperaturas de Superficie Calibradas a partir de distintos métodos de regresión lineal múltiple, mayo 2011	105
6.11. Los datos corresponden a la estación meteorológica de la comuna de Los Andes, mayo 2011	106
6.12. Análisis del modelo de regresión, al utilizar el método paso paso-atrás	106
6.13. Resultados de Coeficientes y Pruebas de Anova	107
6.14. Comparación entre Temperatura de Superficie y Temperatura de Superficie Calibrada mediante regresión lineal múltiple, mayo 2011	107
6.15. Los datos corresponden a la estación meteorológica de La Cruz, mayo 2011	108
6.16. Análisis del modelo de regresión al utilizar el método paso paso-atrás, estación meteorológica de la comuna de La Cruz, mayo 2011	108
6.17. Resultados de Coeficientes y Pruebas de Anova	108
6.18. Comparación entre Temperatura de Superficie y Temperatura de Superficie Calibrada mediante regresión lineal múltiple	109
6.19. Resultados obtenidos tras regresión lineal múltiple al utilizar el software GeoDa, mayo 2015	111
6.20. Resumen estadístico de la regresión	111
6.21. Resultados obtenidos tras regresión lineal múltiple al utilizar el software GeoDa, mayo 2015	112
6.22. Resumen estadístico de la regresión	112
6.23. Análisis del modelo de regresión	113
6.24. Número de ocurrencia de helada, estación meteorológica de San Felipe y La Cruz . .	113
6.25. Resumen de número y probabilidad de heladas para el año 2015	113
7.1. Escalas espacio - temporales horizontales en el estudio de la atmósfera	117
7.2. Estimación de temperaturas por medio de regresión lineal múltiple en la Escuela agrícola de San Felipe predichas a 24 horas, julio 2013	123

ÍNDICE DE TABLAS

7.3. Análisis del modelo de regresión, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, julio 2013	124
7.4. Comparación entre temperaturas modeladas y las temperaturas de la estación meteorológica predichas a 24 horas, julio 2013	124
8.1. Factor de escala de las capas Daily Nighttime Land Surface Temperature y Night Clear Sky Coverage	134

LISTA DE ACRÓNIMOS

AGROMET Red Agroclimática Nacional

ARW The Advanced Research WRF

BPR Bienes Públicos Regionales

CAEARTE Consultoría de Aplicaciones Espaciales en Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias

CFSv2 Climate Forecast System

CIREN Centro de Información de Recursos Naturales

CMNUCC Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático

CONAE Comisión Nacional de Actividades Espaciales

CRIA Centro Regional de Información Agrometeorológica

DMC Dirección Meteorológica de Chile

EIRD Estrategia Internacional de Reducción de Desastres

ENIAC Electronic Numerical Integrator and Computer

ENOS El Niño - Oscilación del Sur

ESA Agencia Espacial Europea

EVI Enhanced Vegetation Index

FTP Protocolo de Transferencia de Archivos

GDAL Geospatial Data Abstraction Library

LISTA DE ACRÓNIMOS

GFDL Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos

GFS Global Forecast System

HDF-EOS Hierarchical Data Format - Earth Observing System

HIRLAM High Resolution Limited Area Model

IGARSS International Geoscience and Remote Sensing Symposium

INMET Instituto Nacional de Meteorología

LANDSAT Land Satellite

LP-DAAC Land Processes Distributed Active Archive Center

LST Land Surface Temperature

MAH Marco de Acción de Hyogo

MASS Mesoscale Atmospheric Simulation System

MINAGRI Ministerio de Agricultura

MM5 PennStateNCAR

MODIS Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MODLAND Equipo científico de MODIS

MRT Modis Reprojection Tool

MYD11A1 MODIS/Aqua V5 LST/E Daily L3 Global 1 Km Grid

NASA National Aeronautics and Space Administration

NCAR National Center for Atmospheric Research

NCEP Centros Nacionales del Océano y la Atmósfera Nacional de Predicción Ambiental

ND Nivel Digital

NMM Nonhydrostatic Mesoscale Model

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

NUMPY Numerical Python

OET Organización para Estudios Tropicales

LISTA DE ACRÓNIMOS

OMM Organización Meteorológica Mundial

OSGEO The Open Source Geospatial Foundation

ONEMI Oficina Nacional de Emergencias

PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

RADAR Radio Detection and Ranging

RAMS Regional Atmospheric Modeling System

SAR Radar de Apertura Sintética

SI Sistema Internacional de Unidades

SIG Sistema de Información Geográfico

SMOS Satélite de Humedad Terrestre y Salinidad en los Océanos

SPA Anticiclón del Pacífico Sur

SRC Sistema de Referencia de Coordenadas

SWW Cinturón de Vientos del Oeste

TS Temperatura de Superficie

TA Temperatura del Aire

VARI Visible Atmospherically Resistant Index

UTC Coordinated Universal Time

UTM Universal Transversal de Mercator

WGCV Grupo de trabajo del comité de satélites de la Tierra sobre Calibración y Validación

WRF The Weather Research and Forecasting Model

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura es una de las actividades de mayor explotación de recursos naturales, la cual es altamente sensible a las variaciones climáticas. Dado que cultivos y cosechas se encuentran expuestos a largos periodos de variación meteorológica, resulta imprescindible el estudiar y generar información sobre aquellos fenómenos meteorológicos que tienen interrelación con esta y que puedan producir afectación sobre la misma. Las cifras del Banco Mundial para el año 2016, indican que el aporte del sector agrícola al PIB nacional alcanza el promedio de un 4,3 %, siendo el área frutícola quién destaca con un 33 % del total del sector.

Será la Meteorología, la ciencia encargada del estudio de la atmósfera, de sus propiedades y de los fenómenos que en ella tienen lugar y que se basa en el conocimiento de una serie de magnitudes o variables meteorológicas como la temperatura, la presión atmosférica o la humedad, las cuales varían tanto en el espacio como en el tiempo. Por lo anterior, será relevante el poder conocer, el medir y estimar dichos fenómenos y variables (ODEPA, 2013).

Uno de estos fenómenos meteorológicos significativos es el denominado *helada*, cuya eventual predicción y conocimiento de su periodo de duración, es un dato muy importante a la hora de considerar desde un punto de vista económico y social, por ejemplo, calendarios agrícolas. Este fenómeno, puede causar una parcial o total destrucción de los cultivos, como también un retardo en su desarrollo (Bagdonas *et al.*, 1978).

La variable fundamental asociada al fenómeno de ocurrencia de heladas es, sin duda, la temperatura, aunque hay otras que pueden influir tanto en forma directa como indirecta, tales como la humedad relativa del ambiente y los vientos (Fernandez *et al.*, 2005).

Se entenderá por temperatura, según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como la condición que determina la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos. Esta magnitud permite expresar el grado de calentamiento o enfriamiento de los cuerpos.

Una helada, se produce cuando la Temperatura de Superficie (TS) desciende por debajo de 0 °C. Sin embargo, la temperatura que se mide e informan las estaciones meteorológicas es la correspondiente al interior de la casilla situada a 1,5 m de altura, por lo que la *ocurrencia de heladas* se informa cuando esta temperatura ha descendido por debajo de 0 °C (Villaseca *et al.*, 1992).

Las heladas, están asociadas a daños y pérdidas en la producción agrícola, por ejemplo en la fruticultura para Chile. A temperaturas por debajo de 0 °C, el metabolismo de un vegetal comienza a hacerse más lento, mientras que el agua en estado líquido tiende a solidificarse. Esto puede producir el rompimiento de las paredes celulares con la consiguiente muerte celular. Para que esto se produzca, es necesario que el periodo en el que la temperatura esté por debajo de 0 °C sea lo suficientemente prolongado. Por otro lado, la severidad de una helada dependerá de la disminución de la temperatura del aire y de la resistencia de los seres vivos a ella (Castro *et al.*, 2009).

En la actualidad, nuestro país se encuentra suscrito a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD) y el Marco de Acción de Hyogo (MAH). A partir de entonces, ha habido progresos relevantes en el establecimiento de una Gestión de Riesgo Agroclimático acorde con las necesidades del sector, ejercido por las distintas instituciones del Ministerio de Agricultura (MINAGRI) (Meza *et al.*, 2011).

La Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI), se encuentra potenciando la estrategia de prevención principalmente en impactos generados por los sistemas de heladas, asesorando a los distintos niveles político administrativos, en las regiones, acerca del diagnóstico, la preparación, los mecanismos de prevención y los procedimientos para la rehabilitación en los distintos campos de acción de la protección civil y en coordinación con el MINAGRI en los ámbitos de acción que le compete a este sector para reducir el impacto generado por manifestaciones climáticas y meteorológicas (ONEMI, 2009).

La presente propuesta de trabajo está centrada en el desarrollo de una herramienta metodológica que, a través de la integración de datos satelitales, de superficie y modelados, permita pronosticar la ocurrencia de heladas. Para ello, la principal variable a considerar será la TS, analizando el producto MODIS/Aqua V5 LST/E Daily L3 Global 1 Km Grid (MYD11A1), el cual consta de una resolución temporal diaria. Estas estimaciones se validarán utilizando datos de campo, teniendo en cuenta la altura geográfica y la temperatura del aire registrada más próxima a la hora de la pasada del satélite por la estación meteorológica. Por último, se correlacionarán los eventos de probabilidad de ocurrencia de heladas con variables meteorológicas tales como la humedad relativa del ambiente, la velocidad del viento, entre otras.

1.1. Motivación

Esta surge tras la vigente necesidad de conocer, el obtener e integrar datos mediante una herramienta técnica que permita otorgar información sobre este agresivo fenómeno meteorológico que afecta de forma directa a la producción agrícola en el campo y al agricultor.

La realización de esta investigación se fundamenta en la entrega de información validada científicamente, con la cual el agricultor pueda hacer frente a las etapas de mayor riesgo de su cosecha, tales como la floración y formación del fruto. Por ello, el conferir información de la ocurrencia de una helada temprana o tardía es verdaderamente significativa, dado que, con estos antecedentes se podrían abordar rápidamente medidas de control pasivas o activas que ayuden a minimizar todo tipo de riesgo asociado a estas temperaturas. Considerando que no existe una homogeneidad en los datos entregados por las estaciones meteorológicas y que además no son representativos de toda un área, adquiere importancia el sostener estos modelos ya construidos con datos obtenidos por medio de la utilización de sensores remotos, los que eventualmente pueden permitir la realización de análisis multitemporal, pues, (no resulta desconocido, que por medio de información espectral captada en el infrarrojo térmico es posible estimar la temperatura de superficie) y otros índices significativos.

El tema académica y profesionalmente significó un gran desafío, dado que se necesitó de perfeccionamiento en el manejo de diversas técnicas de procesamiento en volumen de datos para poder realizar el análisis de imágenes satelitales desde el lado de la programación y optimización de tareas con lenguajes computacionales desconocidos por mi e intentando obtener los resultados esperados utilizando en un alto porcentaje de esta investigación software libre y de código abierto.

1.2. Objetivo General

Diseñar y desarrollar propuestas metodológicas para la predicción de probabilidad de ocurrencias de heladas en base a datos satelitales, de superficie y modelados. Se utilizarán productos del satélite Aqua/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), datos de campo y una implementación experimental del modelo The Weather Research and Forecasting Model (WRF) realizado por la Consultoría de Aplicaciones Espaciales en Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias (CAEARTE) – Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

1.3. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión del *estado del arte* que sustente a los sistemas operativos de pronósticos de heladas para aplicaciones en zonas productivas, con la finalidad de reconocer las principales variables meteorológicas que puedan considerarse para la predicción y alerta de este tipo de fenómenos, así como de los sensores remotos y las técnicas de teledetección empleadas.
- Diseñar y desarrollar aproximaciones metodológicas para la predicción de ocurrencias de heladas.
- Elaboración de mapas históricos de *probabilidad de ocurrencia de heladas* en base a la TS obtenidas a partir de los datos del producto MYD11A1 y a la presencia o ausencia de nubes. Esto es, dada una serie temporal de imágenes MODIS - satélite Aqua, se obtendrán los datos en los que la TS sea menor que 0 °C, los cuales se asociarán a los eventos de ocurrencia de heladas utilizando el modelo de *Pouteau et al., (2011)*.
- Mediante la utilización de datos de estaciones meteorológicas, se identificarán los eventos en los que se produjeron heladas y se los asociará a la TS correspondiente a tal día. Esto se hará mediante el ajuste de los pares (TS, helada: 0 ó 1) utilizando una regresión “lineal”. De esta manera, se determinará un valor umbral de TS correspondiente a la ocurrencia de heladas. Se evaluará el posible cambio del valor de umbral según el área considerada.
- Enfocar el análisis al uso de otros productos de MODIS, además de la TS y de otras variables meteorológicas provistas por estaciones meteorológicas (la humedad, la velocidad del viento) y geográficas para realizar una “regresión lineal múltiple” y a partir de la misma, el obtener y el observar si la predicción de ocurrencia de heladas mejoró al introducir nuevos elementos al modelo.
- Evaluar y usar variables meteorológicas pronosticadas, para reemplazar o agregar en la “regresión lineal multivariable” a partir de la cual se obtendrá la predicción de ocurrencia de heladas. Esto es, con el objetivo de aplicar el método en regiones para las cuales no se dispone de datos de estaciones meteorológicas terrestres.
- Comparar los métodos y evaluar las situaciones más adecuadas de uso.

1.4. Estructura de la Tesis

La estructura del documento está organizada de la siguiente manera:

- **El capítulo 2** contiene *fundamentos teóricos* acerca del fenómeno climático de las heladas, además de la realización de una revisión al *estado del arte* en la literatura para conocer el cómo se plantea y si se desarrolla alguna técnica en particular para establecer e identificar dicho fenómeno mediante el uso de la teledetección.
- **El capítulo 3** corresponde a la descripción del *área de estudio*.
- **El capítulo 4** considera los *materiales y métodos*, en donde se describe un resumen introductorio acerca de la teledetección, del tipo de satélite, el sensor, el producto que se utilizó y la metodología empleada durante la elaboración de la tesis. Así como también, una breve explicación del cómo se implementó el *algoritmo* utilizado para la obtención de los datos.
- **El capítulo 5** dará a conocer el cómo se validaron los datos meteorológicos entregados por distintos organismos y los datos de temperatura obtenidos del producto MYD11A1. Luego, se procedió mediante la aplicación de modelos y pruebas estadísticas el establecer y conocer algún tipo de correlación entre la temperatura de superficie y la temperatura del aire. Se obtienen umbrales de temperaturas mensuales que permitirán alertar eventuales ocurrencias de heladas, además, de un resumen comparativo entre las heladas declaradas por la estación meteorológica y las obtenidas mediante el procesamiento satelital, junto a las probabilidades de ocurrencia mensual para ambos casos.
- **El capítulo 6** busca integrar nuevas *variables independientes* utilizando regresiones lineales múltiples con la finalidad de conocer si estas incrementan o no la correlación entre la temperatura de superficie y la temperatura del aire en diversas estaciones meteorológicas.
- **El capítulo 7** dará a conocer el origen de los *modelos climáticos* y se intentará la implementación experimental del modelo WRF realizado por CAEARTE – CONAE junto a modelos lineales, los cuales buscarán predecir en un futuro cercano la probabilidad de ocurrencia de heladas.
- **El capítulo 8** contiene las *conclusiones finales* del trabajo y *lineamientos* sobre trabajos futuros a realizar para mejorar el modelo de *predicción de ocurrencias de heladas*.

Finalmente, se entregó un anexo en el cual se da a conocer un sitio o portal de descargas de imágenes MODIS, incluyendo además, una breve explicación del código y lenguaje computacional utilizado.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

La palabra *helada* se refiere a la formación de cristales de hielo sobre una superficie, ya sea por congelación del rocío o por la fase de cambio de vapor a hielo (Blanc *et al.*, 1963).

Sin embargo, la palabra es ampliamente utilizada para describir un fenómeno meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelamiento (Snyder y Abreau, 2010).

También puede ser definida como la aparición de temperaturas inferiores o iguales a 0 °C medida a una altura entre 1,25 y 2,0 m (Hogg, 1971).

En el sector rural, cuando la temperatura del aire por la noche baja más allá de los 0 °C, se dice “va a caer una helada”, lo que indica que las bajas temperaturas podrían “quemar” o dañar los cultivos.

Una helada puede experimentar diversos grados de intensidad dependiendo de las condiciones topográficas del lugar, del tipo de helada, del grado de humedad y laboreo del suelo (Martinez *et al.*, 2007).

Lo regular, es que bajo condiciones ideales de una helada, es decir, noches despejadas y sin viento (*para no perturbar la estratificación de las capas bajas de la atmósfera*), la temperatura disminuya por la influencia de la liberación de radiación desde el suelo, pudiendo llegar bajo el punto de congelación al amanecer (Ellison, 1928).

No obstante, bajo condiciones de nubosidad o neblina, la radiación infrarroja desde la atmósfera hacia el suelo se incrementa, dependiendo de la temperatura de las nubes o de la neblina; por lo tanto, la pérdida neta de energía es menor (Snyder y Abreau, 2010).

Los daños por bajas temperaturas (*frío y congelación*), pueden producirse en todas las plantas, pero los mecanismos y la tipología del daño varían considerablemente. Algunos cultivos frutales, hortícolas y ornamentales de origen tropical experimentan daños fisiológicos cuando están sometidos a temperaturas por debajo de 12,5 °C, bastante por encima de las temperaturas de congelación. Sin embargo, el daño por encima de 0 °C es más por enfriamiento que por helada. Así también, el grado de daño varía según la especie, etapa de la vida, el tejido (*vegetativa o reproductiva*), y la fase fenológica (Rigby y Porporato, 2008).

El daño que provocará entonces una helada, se estableció como el producido por la formación de hielo en el interior de las células, que crece como agujas y perfora las membranas celulares (Rodríguez *et al.*, 2011).

Normalmente, los porcentajes de daño por helada se basan en la exposición de tejidos de plantas a temperaturas críticas durante media hora, donde las temperaturas del aire se miden en una garita meteorológica a una altura de 1,5 m (Perry, 1994).

Durante los periodos fríos, las plantas tienden a solidificarse contra el daño por congelación, y pierden el endurecimiento después de un periodo de calentamiento. En todo proceso de congelación está directamente relacionada el *agua*.

El agua, es el termorregulador biológico más importante. Este elemento se encuentra presente en todos los organismos vivos y participa en una serie de reacciones metabólicas y procesos del vegetal. Es así, que las bajas temperaturas tienen una influencia sobre los tejidos u órganos, los cuales al estar constituidos por células y estas por un gran porcentaje de agua, se ven afectados directamente.

Para abordar un acontecimiento de esta magnitud es necesario tener un conocimiento acabado de ciertos conceptos y fundamentos que relacionan este evento con los vegetales (Toledo, 2002).

La presencia de agua sobre las superficies de las plantas también afectará al daño por helada. Las superficies secas de las plantas se congelan a una temperatura del aire más baja que las superficies húmedas (Powell y Himelrick, 2000).

Gil (1992), señala que el factor más importante dentro de la agricultura y la climatología es la termometría o estudio de las temperaturas, ya que influye en todos los procesos que realiza la planta, la cual se ve afectada mayormente por sus extremas.

Estas temperaturas extremas en Chile, se ven atenuadas por la influencia marina, pero la topografía accidentada contribuye a crear una gran variedad en la incidencia de estas temperaturas.

2.1. La congelación a nivel celular

La congelación es el proceso de solidificación del agua. Durante el proceso se genera una alta concentración de sólidos solubles, lo que provoca una baja en la cantidad de agua libre intracelular y extracelular, por lo cual, el agua *contenida* es transformada en hielo.

El agua es el principal componente de la célula. En el proceso de congelación, la formación y el crecimiento de los cristales de hielo producen modificaciones en la célula. Los componentes celulares solubles pueden ser saturados y precipitar; modificaciones del pH pueden afectar los complejos coloidales; cambios muy marcados en la presión osmótica pueden romper las membranas semipermeables (Toledo, 2002).

2.1.1. Formación de hielo

El hielo es agua congelada, su temperatura es siempre inferior a 0 °C, pues el agua pura se congela a 0 °C a presión atmosférica.

A presiones mayores, el punto de congelamiento disminuye levemente, así como también cuando el agua contiene sales en solución (Iriondo, 2007).

El comienzo de la congelación (*formación de cristales de hielo*), depende en gran medida de la concentración de sólidos solubles y no de su contenido en agua (*propiedades coligativas, sólo dependen de la concentración del soluto y no de la naturaleza de sus moléculas*).

Los órganos y tejidos de una planta están constituidos por grupos celulares, por lo que la congelación está dada por la existencia de la temperatura a la que aparecen los primeros cristales de hielo y de un intervalo de temperatura para que el hielo se forme.

2.1.2. Cristalización del hielo

El proceso de cristalización del hielo involucra las etapas de *nucleación o formación y crecimiento del cristal* (Castro *et al.*, 1984).

La nucleación será el comienzo de la congelación, el cual involucra la presencia o formación de pequeños núcleos que son los centros de los cristales que se forman. Técnicamente, la nucleación se puede definir como la generación, dentro de un sistema metaestable o fase, de la partícula más pequeña de una fase extraña estable capaz de crecer espontáneamente.

Entre los factores que influyen en el crecimiento del cristal se encuentran los siguientes:

- a) La velocidad a la cual las moléculas reaccionan en la superficie del cristal.
- b) La velocidad de difusión de las moléculas de agua desde la solución no congelada a la superficie del cristal y la velocidad a la cual se remueve el calor.

2.1.3. Conductividad térmica

Esta propiedad mide la capacidad que posee un cuerpo para conducir la energía térmica a través de sí mismo.

Rodríguez y Marín (1999), sostienen que la conductividad térmica del agua aumenta ligeramente con la temperatura (*a presión constante*), lo que considera el intervalo comprendido entre su punto de fusión y el de ebullición ($0\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La conductividad térmica del hielo a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ es *cuatro veces* mayor que la del agua líquida a igual temperatura, lo que implica una mayor capacidad de conducción del calor por parte del hielo.

2.1.4. Velocidad de congelación

La temperatura (T°) de la célula y el medio extracelular, comprendida entre los $0\text{ }^{\circ}\text{C} / -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, constituye el periodo de congelación.

A pesar que el punto de congelación del citoplasma celular se encuentra a $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, las células se congelan entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C} / -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, después de la congelación del medio extracelular ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esto indica que la membrana celular impide la formación de hielo en el citoplasma. La formación de cristales extracelulares aumenta la concentración de sales del medio y establece en consecuencia una diferencia de potencial osmótico con la célula no congelada.

Diversos mecanismos son activados para establecer el equilibrio entre el interior y exterior de la célula:

- a) La salida del agua celular.
- b) La formación de una fase sólida en el interior de la célula.

Entre los $-10\text{ }^{\circ}\text{C} / -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ los fenómenos físicos de la célula son determinados por la velocidad de enfriamiento (Palma *et al.*, 1993).

2.2. Factores que influyen sobre la intensidad de una helada

Norero (1991), estipula que los factores que influyen sobre la *Intensidad* de una helada son los siguientes, ver Figura 2.1.



Figura 2.1: Factores que influyen sobre la intensidad de una helada

Fuente: Impacto de las heladas en la agricultura, Norero (1991).

- Factores Macrometeorológicos: el estudio de estos factores es valioso para interpretar el régimen agroclimático de las heladas y contribuye a su pronóstico.
- Factores Micrometeorológicos: estos son de carácter local, influyen en la intensidad y duración de la helada y, por consiguiente, en la magnitud de los daños. Su estudio sirve para la implementación práctica y local de los pronósticos y para aplicar algunos métodos de prevención y combate (Norero, 1991).

2.3. Clasificación de las heladas

Norero (1991), establece criterios de *Clasificación* según su época de ocurrencia, proceso físico que les da origen y efectos visuales que estas causan sobre los cultivos, ver Figura 2.2.

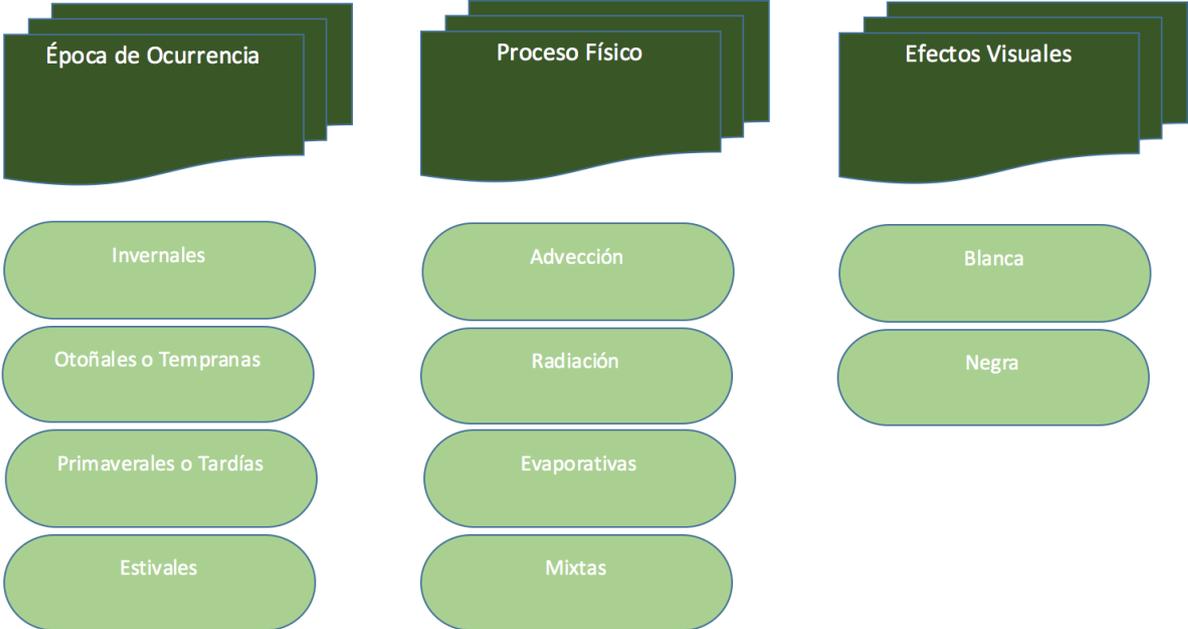


Figura 2.2: Clasificación de las heladas
Fuente: Impacto de las heladas en la agricultura, Norero (1991).

2.3.1. Época de ocurrencia

Heladas invernales

Se sostiene que este tipo de heladas son las más numerosas, pero por lo general son las que provocan menos daño, debido a que en este periodo la mayoría de las plantas se encuentran en reposo vegetativo y, por lo tanto, en condiciones de soportar mejor las bajas temperaturas (Norero, 1991).

Heladas otoñales y primaverales

También clasificadas como tempranas y tardías, respectivamente. Estas heladas son las que suelen provocar mayores estragos en la agricultura porque ocurren en épocas de intensa actividad vegetativa (Norero, 1991).

Villaseca *et al.* (1992), indica que en la primavera y otoño, las plantas tienen una gran sensibilidad a los descensos bruscos de temperatura. Las heladas tardías por lo general causan daño a la floración, foliación y fructificación de las plantas perennes. Las heladas tempranas, por otra parte, pueden interrumpir bruscamente el proceso de maduración de los frutos y la formación de yemas, de las cuales dependerá la producción del año siguiente (Norero, 1991).

La probabilidad de ocurrencia de heladas disminuye a medida que avanza la primavera, mientras que a medida que la etapa de flor se desarrolla, ésta se hace más susceptible al daño por heladas (Crisosto, 1989).

En las heladas primaverales, el frío afecta a los órganos en actividad y en estados de gran sensibilidad. En este caso, temperaturas ligeramente inferiores a 0 °C pueden causar daños en los órganos. Estas heladas son un problema importante en muchas zonas frutícolas (Urbina, 2007).

Heladas estivales

Estas heladas se producen en época de verano, sin embargo, su posibilidad de ocurrencia en el valle central del país es casi nula, debido a un promedio de las temperaturas mínimas superior a los 10 °C (Guzman y Alonso, 2001).

2.3.2. Proceso físico

Heladas de advección

Se producen por efecto de un frente de aire frío proveniente del polo sur que invade el continente y alcanza la zona central. El fenómeno se da en vastas extensiones, con temperaturas bajas durante todo el día y velocidades de viento superiores a 10 km/h. En áreas de laderas, la menor temperatura se observa en los sectores medios y altos por estar más expuestos a los vientos.

Respecto a la temperatura del aire, ésta es prácticamente la misma en superficie como en altura (Martinez *et al.*, 2007).

Heladas de radiación

Son de carácter microclimático. Estas heladas radiativas son unas de las condiciones climáticas más severas que afecta a las actividades agrícolas en muchas partes del mundo (Avisar y Mahrer, 1988).

Se caracterizan por una gran pérdida de calor del suelo durante la noche, favorecida por el escaso o nulo viento y por un cielo sin nubosidad (Villaseca *et al.*, 1992).

El suelo, al perder calor, enfría más rápidamente la capa de aire en contacto con él que aquellas ubicadas a mayor altura, lo que se conoce como inversión térmica. La situación normal, sin inversión térmica, ocurre durante el día y es cuando la máxima temperatura del aire se alcanza en la superficie y disminuye con la altura (Martinez *et al.*, 2007).

Martinez *et al.* (2007), considera que debido a la inversión térmica, la temperatura cercana al suelo que afecta a los cultivos bajos, es inferior a la temperatura registrada en el cobertizo meteorológico en 2 °C / 3 °C.

Heladas evaporativas

Se producen cuando ingresa un frente frío y produce lluvia. Esta agua que queda depositada sobre los vegetales y el suelo, se evapora a expensas de quitarle calor al suelo y a los órganos vegetales, principalmente. Es decir, un gramo de hielo debe absorber 335 Joule (80 cal) para transformarse en agua líquida y ésta, a su vez, 2 510 Joule (600 cal) para formar vapor de agua. A la inversa, al condensarse un gramo de vapor de agua se liberan 2 510 Joule, y al congelarse un gramo de agua líquida se liberan 335 Joule. Este fenómeno es de gran importancia, pues constituye la base del uso de algunos sistemas de protección contra heladas (Villaseca *et al.*, 1992).

Heladas mixtas

Se denominan de este modo porque se combina el ingreso de masas de aire frío y simultáneamente, hay un enfriamiento por pérdida de calor del suelo. Normalmente, se inician como una helada de advección y posteriormente como una helada radiativa (Gala, 1993).

El efecto en las plantas es más grave que el producido por cada una en forma separada (Villaseca *et al.*, 1992).

2.3.3. Efectos visuales

Heladas blancas

Tassara (2007), señala que este tipo de heladas se produce debido al descenso de la temperatura a valores iguales o menores a 0 °C, con elevada humedad ambiental, donde se alcanza rápidamente el punto de rocío, produciéndose una importante liberación de calor al ambiente como resultado de la condensación. Si la temperatura sigue disminuyendo, el agua condensada sobre el follaje se congela, produciendo una liberación de calor, manteniendo la temperatura de las hojas cercanas a 0 °C. En este caso se habla de heladas blancas, por la formación de hielo, que generalmente producen muy poco daño (Villaseca *et al.*, 1992).

Heladas negras

Están asociadas a daños graves. Son heladas producidas con baja humedad ambiental, en las que se llega recién al estado de saturación de vapor con temperaturas muy por debajo de 0 °C.

La Figura 2.3 hace referencia al *necrosamiento* de los órganos vegetales de la planta, destacándose por su color *negro* (Pannunzio, 2009).



Figura 2.3: Daño producido por una helada negra, asociada principalmente a una menor cantidad de humedad ambiental

Fuente: <http://2.bp.blogspot.com>

2.4. Efectos de las heladas en los cultivos

Los cultivos son vulnerables a la helada, cuando *la temperatura del aire* desciende hasta formar cristales de hielo en el interior de sus células durante cierto tiempo. El proceso de deterioro de las plantas depende del estado vegetativo en que se encuentre y de la especie a la que pertenece, ver Figura 2.4.

A continuación se describen algunos de estos efectos (Ramírez *et al.*, 2001).

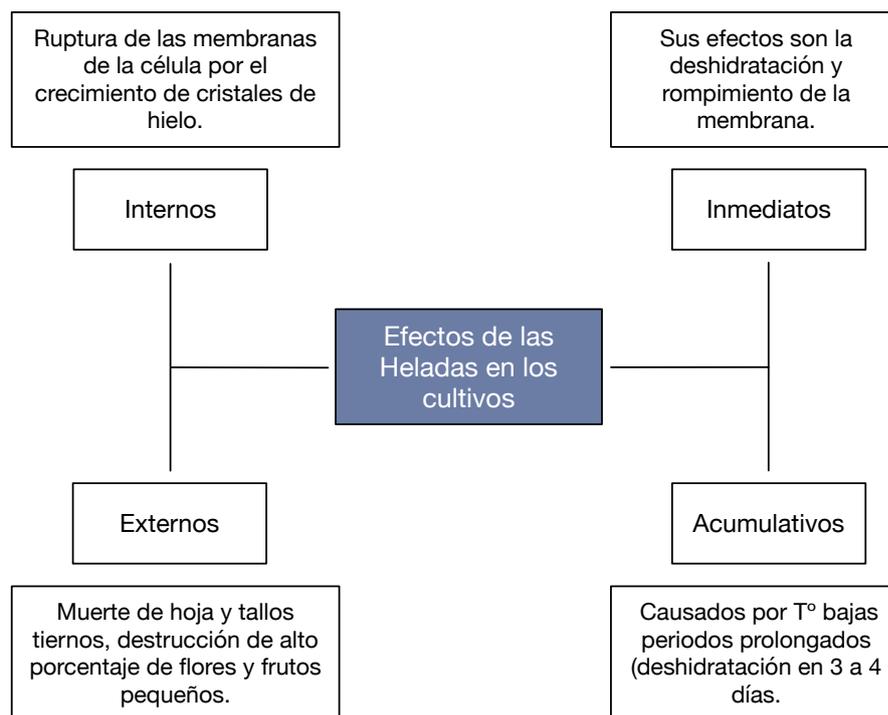


Figura 2.4: Diagrama de los efectos de las heladas en los cultivos

Fuente: Reporte técnico de las heladas, Ramírez (2001).

2.5. Estrategias en el control de heladas

Las tasas de transferencia de energía determinan a que nivel de enfriamiento se llegará y que tan eficaces fueron los métodos de protección contra heladas. Las cuatro formas principales de transferencia de energía, que son importantes en la protección contra heladas son la radiación; la conducción (o *flujo de calor*); la convección (*transferencia de calor sensible y calor latente en el fluido*) y los cambios de fase asociados con el agua, ver Figura 2.5.

En la protección contra heladas, el interés principal está en la densidad de flujo de calor (G) en la superficie del suelo. El calor sensible es la energía que podemos “sentir” y la temperatura es una medida del contenido de calor sensible del aire (Snyder y Abreau, 2010).

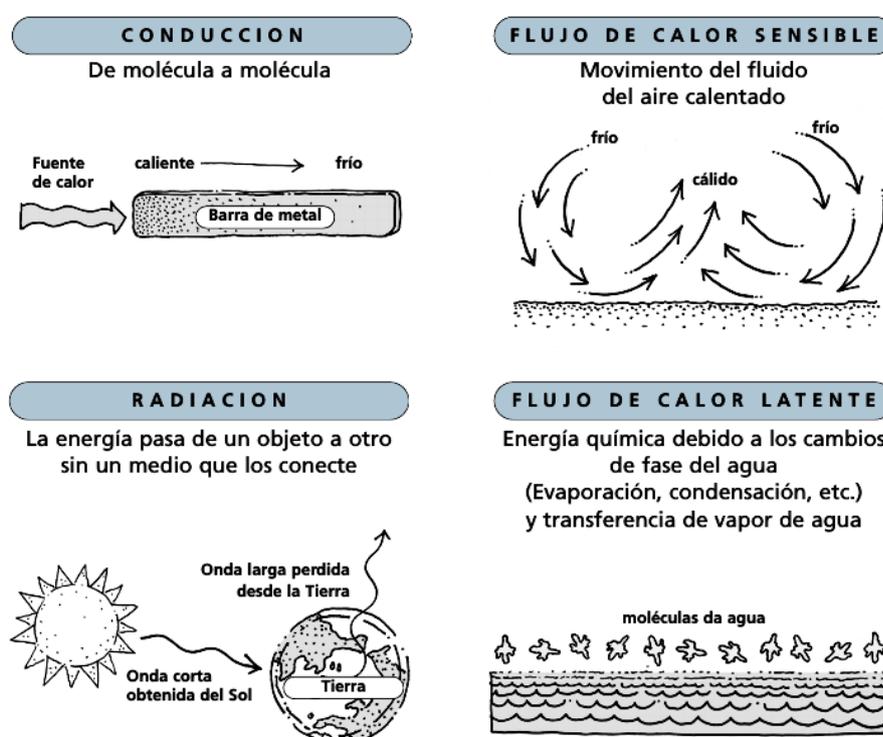


Figura 2.5: Formas de transferencia de calor

Fuente: Protección contra las heladas; fundamentos, práctica y economía - FAO (2008).

Las técnicas de protección contra heladas normalmente se dividen en métodos indirectos y directos (Bagdonas *et al.*, 1978) o en métodos pasivos y activos (ODEPA, 2013).

2.5.1. Controles pasivos

Son aquellos manejos culturales que están directamente enfocados a disminuir o atenuar los daños por bajas temperaturas como método de prevención, normalmente para un periodo largo de tiempo y cuyas acciones son particularmente beneficiosas cuando se producen las condiciones de helada, ver Figura 2.6.

Estos 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 (Rodríguez *et al.*, 2011).

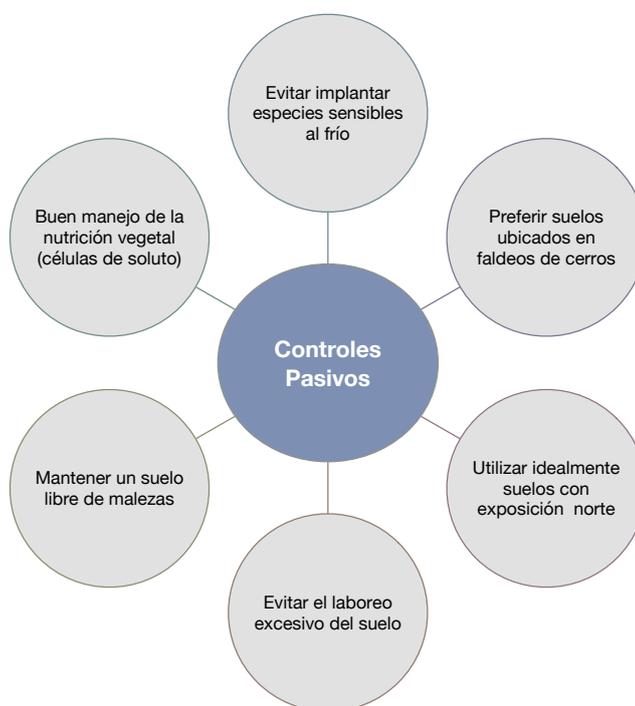


Figura 2.6: Diagrama de controles pasivos

Fuente: <http://www.odepa.cl>

2.5.2. Controles activos

Son aquellos métodos aplicados al comienzo y durante la ocurrencia del fenómeno climático. El principio de estos métodos es muy simple; la helada se debe a un descenso de las temperaturas, por lo tanto, se debe evitar el enfriamiento. Para evitar una helada es suficiente, en teoría, aportar a la superficie de suelo una energía igual a aquella pérdida por dicha superficie, que es lo que provoca el enfriamiento, ver Figura 2.7.

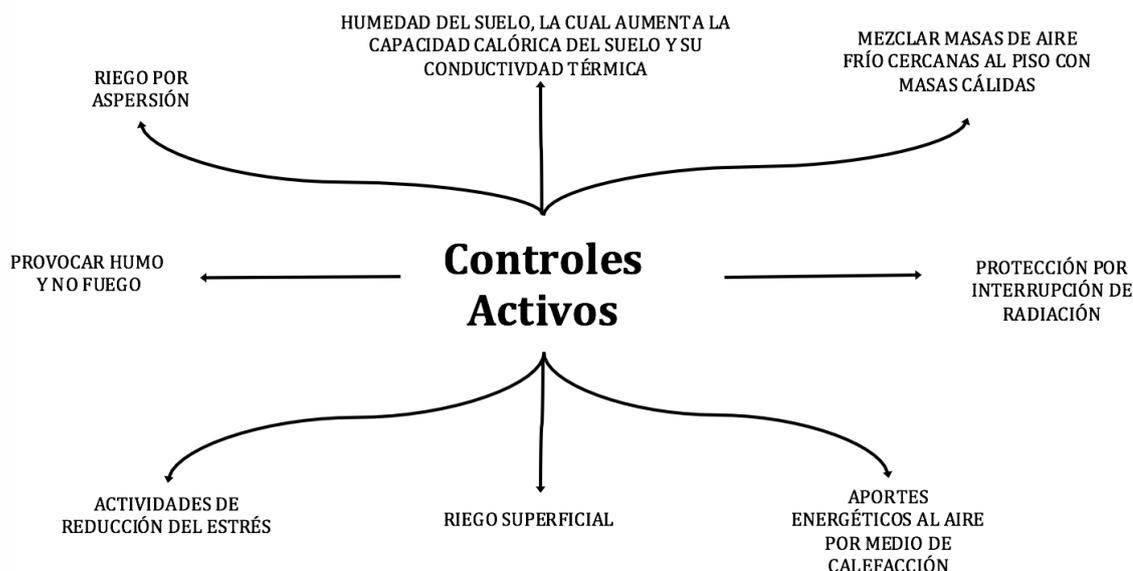


Figura 2.7: Diagrama de controles activos

Fuente: <http://www.odepa.cl>

También existen métodos que actúan directamente sobre la temperatura de las plantas. En condiciones de riesgo de heladas, los controles activos tratan de lograr un aumento de la temperatura del aire mediante aportes externos de energía destinada a contrarrestar la disminución ocurrida por radiación. Algunas fuentes de esta energía son la combustión de materiales, la proveniente del calor latente de fusión de agua aplicada sobre los órganos a proteger, y el mayor nivel energético derivado de la mezcla de capas de aire con mayor temperatura con otras de menor temperatura.

2.6. Tipos de heladas en Chile

Yuri (1991), establece que en Chile se pueden reconocer fundamentalmente dos tipos de heladas, las que afectan en mayor o menor intensidad la fruticultura.

El valle central de Chile tiene un régimen de heladas relativamente benigno, no obstante esto, las heladas tardías de primavera pueden producir problemas de producción durante la floración y la cuaja (Santibañez, 1987).

2.6.1. Helada de advección

Es producida por una invasión de masas de aire frío en movimiento a gran escala en un área en condiciones de mucho viento, las cuales traen consigo condiciones de baja humedad y temperaturas polares (Richards y Baumgarten, 2003).

Son las denominadas *olas de frío*, que pueden ir acompañadas de vientos y precipitaciones de nieve y que generalmente se producen por corrientes de vientos de dirección norte-sur (Gil, 1992).

Estas heladas ocurren asociadas a una brisa fría y no son acompañadas de rocío, por lo que su acción es más dañina. Su ocurrencia en Chile es normalmente en primavera (*septiembre - noviembre*). Esta helada, a pesar de ser menos frecuente en el país, causa los mayores daños en la fruticultura, debido a que provoca un descenso acelerado de la temperatura y por un tiempo más prolongado que las heladas de radiación. Las temperaturas mínimas alcanzadas suelen ser inferiores a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por este motivo, el efecto pernicioso del frío se produce sin ningún impedimento y al día siguiente o poco tiempo después ello es posible comprobarlo, pues, las partes o plantas sensibles al frío, al morir, adquieren una coloración negruzca (*helada negra*).

2.6.2. Helada de radiación

Es aquella que ocurre por la pérdida de calor radiativo, especialmente en noches claras, sin nubes y en ausencia de viento, lo que permite que ondas calóricas se escapen hacia la atmósfera; lo anterior, se produce en condiciones anticiclónicas post - frontales, preferentemente en Chile se registran entre los meses de junio a agosto. La distribución espacial de este tipo de heladas está estrechamente asociado a la topografía del lugar.

El calor irradiado por el suelo y por las plantas aumenta, contribuyendo a elevar la temperatura hasta una cierta cota, denominada *capa de inversión térmica*, en la que el intercambio de calor suelo - atmósfera es nulo y por encima de la cual la temperatura desciende nuevamente. La altura de la capa de inversión térmica es generalmente de unos 15 a 20 m (Baldini, 1992).

El rocío presente en el suelo y sobre las plantas se congela debido a la baja de temperatura, produciendo abundante escarcha, de ahí que este fenómeno se conozca como *heladas blancas*.

2.6.2.1. Daños producidos por heladas a diversos cultivos

Dependerán entre otros factores de la duración e intensidad de la helada. Además, es determinante el estado fenológico del cultivo según su grado de sensibilidad a la baja temperatura y ubicación geográfica (Yuri, 1991).

Algunos daños a los cuales se vería afectado el cultivo son:

- a) El frío daña o mata órganos vegetativos, tales como hojas y tallos, lo que perturba las funciones de los órganos restantes.
- b) La helada destruye un gran porcentaje de las flores, impidiendo así que muchas de ellas se transformen en frutos.
- c) La baja temperatura destruye los frutos en formación, y los que sobreviven resultan mal formados, ver Figura 2.8.
- d) El frío es lo suficientemente intenso y prolongado como para provocar la muerte de la planta completa.



Figura 2.8: Especies de damascos afectados por las heladas

Fuente: <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/2016/09/12/>

2.6.2.2. Nivel de daño que causa en las especies frutales

Las heladas pueden provocar daños muy graves en los árboles, dependiendo del momento en que se presenten, siendo menores si tienen lugar durante el periodo de reposo de las plantas, que cuando comenzó o terminó el periodo vegetativo. Las bajas temperaturas son nocivas, ya que un elevado porcentaje de flores no abrirán o sólo abrirán al estado femenino o masculino, perdiéndose una gran cantidad.

Las temperaturas irregulares y frías al comienzo de primavera prolongan la floración, lo que provoca cuajas a lo largo de ésta y presentando los frutos diferencias de dos a tres meses en su edad, pudiendo ser la causa de problemas en la exportación. Esto es más importante en áreas cálidas, donde el crecimiento de los frutos es más rápido.

Estas bajas temperaturas en épocas de floración (*menores a 20 °C en el día y bajo a 10 °C en la noche*) pueden provocar una reducción considerable de la cuaja, hecho que se registra periódicamente en las principales zonas productoras de paltas en nuestro país y que afecta mayormente a los huertos que están muy cercanos al mar. En repetidas ocasiones, sucede que en el día no hace mucho frío, pero al bajar la temperatura en la noche, ocasiona la muerte del tubo polínico, el que no alcanza a llegar al ovario para fecundar el óvulo, ver Figura 2.9.

Puede ser que la temperatura no sea tan fría, pero que exista, como es frecuente en Quillota (*región de Valparaíso*) y en otras áreas de producción del país, un viento costero fuerte. Esta velocidad del aire hace que la temperatura baje y que también falle la polinización (Gardiazabal, 1998).



Figura 2.9: Frutales de carozo afectados por una helada
Fuente: <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/2013>

2.7. Estado del Arte

A través del *estado del arte* se buscó realizar una recopilación de diversas fuentes y publicaciones científicas que dieran a conocer las distintas técnicas a través del mundo usando la teledetección y especialmente las referidas al uso de imágenes satelitales derivadas del sensor MODIS y el producto Land Surface Temperature (LST) para hacer un uso investigativo del fenómeno de *las heladas* y un control sobre estas, con la finalidad de dar una validación al tema investigado y ejemplificar tendencias pasadas, actuales y futuras.

2.7.1. Land Surface Temperature - LST

Para Smith *et al.* (1997), LST es un parámetro importante para el entendimiento del ambiente global ya que controla muchos de los procesos subyacentes en el ciclo de la energía en la superficie, el transporte de calor, y del agua entre la superficie y la atmósfera.

La TS dependerá de las diferencias cuantificables entre la radiación que emiten los cuerpos y la emisión del Sol, la cual será diferente a distintas longitudes de onda. La ecuación que nos da la cantidad de energía emitida se conoce como la *Ley de Planck*, la cual establece la relación para el poder de emisión espectral de un cuerpo negro (Planck, 1988).

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.1)$$

donde M_{λ} es la **emitancia espectral** medida en $J s^{-1} m^{-2} \mu^{-1}$. T es la temperatura en grados Kelvin, $c_1 = 3,74 \times 10^8 J s^{-1} m^{-2} \mu^{-1}$ y $c_2 = 1,44 \times 10^4 \mu K$ son constantes. M_{λ} representa la cantidad de energía emitida en la longitud de onda λ por cada metro cuadrado de superficie del objeto cada segundo.

De esta ecuación, relativamente compleja, derivan dos sencillas ecuaciones que describen de forma más simple la relación de la temperatura con la radiación. En primer lugar la *Ley de Stefan-Boltzman*:

$$M = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

que es la integral de la ecuación de la Ley de Planck y permite, por tanto, calcular el total de energía emitida por un cuerpo a la temperatura T sumando las emisiones para cada una de las longitudes de onda, σ es la constante de Stefan cuyo valor es $5,67 \times 10^{-8} J/sm^2 K^{-4}$.

Esta densidad de energía emitida por un cuerpo negro es independiente de la naturaleza del cuerpo, y es función exclusivamente de la temperatura y de la longitud de onda. Esta energía emitida se establece por medio de la Ley de Stefan-Boltzmann que explica que toda materia que no se encuentra a una temperatura infinita emite dos radiaciones térmicas. Estas radiaciones se originan a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie más baja por la que fluyen, la velocidad

a la que libera energía por unidad de área Wm^{-2} se denomina la potencia emisiva superficial y es establecida por la constante σ (*igual al tope máximo de emisión solar*):

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4} \quad (2.3)$$

Debido a que LST es una síntesis de las emisiones térmicas por unidad de área del tamaño de cada píxel en el sensor, las bases físicas se limitan a la extensión del gránulo. Por tanto, diferenciar entre la temperatura de un suelo rocoso y un cultivo agrícola se limita cuando se hace uso de los datos satelitales.

Estos datos, al ser capturados desde un sensor o instrumento puesto en un satélite desde el espacio, llevan consigo *errores* o efectos que deben ser corregidos para generar una información confiable. La exactitud de LST está dada por el uso de un algoritmo (*compuesto*) que tiene en cuenta los efectos atmosféricos, angulares y de emisividad.

2.7.1.1. Temperatura de la Superficie capturada por sensores

Los datos obtenidos hoy en día de LST mediante sensores alojados en satélites pasivos ha generado múltiple información complementaria a estaciones meteorológicas, ya sean convencionales o automáticas y a diversas disciplinas tales como la agricultura, la meteorología, el medio ambiente, entre otras; midiendo ondas electromagnéticas emitidas por el Sol como fuente y que son reflejadas por la superficie terrestre y capturadas por estos sensores que transforman esta en valores digitales que pueden ser cuantificables. La estimación de LST tiene como referencia a la *radiación*.

Estos datos se convertirán en información una vez corregidos y muestran gráficamente por unidad espacial (*píxel*), diferencias con los píxeles vecinos, homogeneidad de sus componentes físicos o la cantidad de brillo aportado en Nivel Digital (ND), entre otros parámetros que se definen según el tipo de sensor.

La estimación de LST usando sensores remotos pasivos se consigue una vez que son separados dos tipos de datos recibidos por el sensor, *la reflectancia de la superficie y la emisividad* (Schmugge *et al.*, 1998).

Se debe volver a indicar que hasta el momento, LST es un producto que resulta de la aplicación de algoritmos desarrollados en la Universidad de California por el Grupo de Temperatura de la Superficie MODIS.

2.7.2. El uso de la Teledetección en las heladas

La sequía y las heladas son dos de los principales desastres naturales para la zona norte agrícola de China, siendo el *trigo* el principal alimento cultivado en esta zona.

Esta investigación fue presentada en el International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) del año 2012.

Se estableció una base de datos de los últimos diez años de imágenes MODIS, en el cual, el principal análisis correspondió a conocer como cambiaban los sensibles índices de vegetación debido a la intervención de estos desastres y a hacer un seguimiento del estrés de los cultivos por las heladas. Para este resultado se construyeron índices para determinar el daño de las heladas a través de Enhanced Vegetation Index (EVI), Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), NDIIb6 y NDIIb7, lo que determina tanto características de verdor y contenido de humedad en el dosel.

El producto Aqua/MODIS (*MYD09A1/V5*) de resolución temporal de ocho días y resolución espacial de 500 metros el píxel, fue el usado para calcular los índices de vegetación durante la etapa de macollaje y reactivación del trigo en invierno y primavera respectivamente, mientras el producto (*MCD12Q1*), fue utilizado para enmascarar el área de recorte.

Se seleccionaron las tierras de cultivo que no tenían ningún cambio en los últimos diez años y se calcularon dos tipos de índices de vegetación (*verdor y contenido de humedad en el dosel*).

Finalmente, se pudo determinar que cuando el trigo de invierno fue afectado por las heladas, el EVI pudo reflejar muy bien las características de estrés del cultivo, seguido de NDIIb6 y NDIIb7 y, cuando el trigo de invierno fue afectado por la sequía, los índices de vegetación del verdor y agua no fueron fácilmente detectados, por lo cual, queda abierta esta etapa a otra futura investigación y análisis (Wang *et al.*, 2012).

Una nueva investigación se basó en la utilización de un satélite de Radio Detection and Ranging (RADAR) usando un Radar de Apertura Sintética (SAR) en banda L, la cual fue la elección óptima dada su frecuencia (*1,5 a 2,9 GHz*) para el seguimiento de la congelación del suelo, debido al alto contraste de la huella entre las fases de congelamiento y descongelamiento del suelo. Parte de la metodología ejecutada consistió en comparar información obtenida de observaciones realizadas con doble polarización de temperatura de brillo, la cual fue evaluada en relación con información auxiliar de propiedades del suelo y de la nieve durante cuatro temporadas de invierno (Rautiainen *et al.*, 2012)

De esta manera, durante los tres primeros periodos de invierno, el lugar de medición estuvo ubicado sobre suelo mineral en un sector sin mayor vegetación dentro de un bosque; para el cuarto periodo de invierno el instrumento de apoyo fue trasladado sobre un humedal, ambos sitios emplazados en Sodankylä, al norte de Finlandia.

Los sitios de prueba representan dos ambientes típicos de la zona de bosques boreales del norte de Finlandia. Los datos se aplicaron para realizar una relación empírica entre el inicio y el progreso de la congelación del suelo observando la firma registrada por la señal de la banda L del satélite de RADAR.

Un algoritmo de recuperación fue desarrollado empleando las observaciones en lugares donde existía una apertura en los bosques. El algoritmo, explota el cambio percibido en la temperatura de brillo y el cambio en la diferencia relativa entre las firmas de polarización horizontal y vertical (*doble polarización*).

Con el conjunto de datos experimentales recogidos, estas características fueron vinculadas de manera óptima para observar el progreso de congelación del suelo mediante la elección del ángulo de observación, la polarización y el promedio temporal.

El objetivo fue desarrollar *métodos de vigilancia global en el suelo* para los procesos de congelación y descongelación por medio de instrumentos de teledetección, tal cual, es el Satélite de Humedad Terrestre y Salinidad en los Océanos (SMOS), el cual posee una banda L, la que es sensible al contenido de agua y que, por otra parte, tiene una aceptable penetración en el suelo superior a otros instrumentos, además, de contar con la transferencia de datos radiométricos desde la torre del SMOS y el RADAR Elbara-II (*banda L*) cedido por la Agencia Espacial Europea (ESA), ver Figura 2.10.



Figura 2.10: Radiómetro en banda L (1-2 GHz) para medir humedad de suelo
Fuente: "Molecular Diversity Preservation International", M.Schwank et al., 2010.

El resultado final de la investigación es ejemplificado mediante la elaboración del siguiente mapa, ver Figura 2.11.

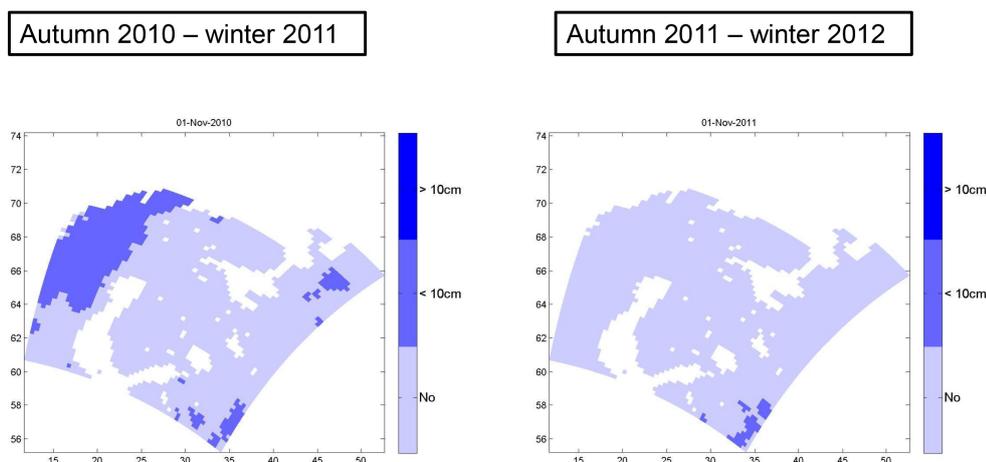


Figura 2.11: Mapa de suelo congelado para los periodos otoño 2010-invierno 2011 y otoño 2011-invierno 2011
Fuente: "Molecular Diversity Preservation International", M.Schwank et al., 2010.

Otra metodología consistió en la realización de un *mapa de riesgo de helada* aplicando información satelital, con la finalidad de complementar la información de estaciones climáticas, dado que en muchas ocasiones no existe para un lugar determinado dicha información, principalmente en áreas con altitud, fuertes pendientes y distintas ocupaciones del suelo; lo que considera además, que el riesgo de heladas tiene una fuerte variabilidad espacial dentro de una corta distancia. Por este motivo, se utilizó el producto LST con una resolución espacial de un kilómetro para la región del valle de Yarra (*Melbourne, Australia*) para un periodo de diez años. (Crimp *et al.*, 2013)

A través de la generación de este mapa, se logró obtener información que permite determinar la ocurrencia de heladas. Sin embargo, se presentó el problema de que los datos obtenidos a través del satélite eran recogidos entre la medianoche y las 02:30 de la madrugada, mientras que las temperaturas son grabadas a otra hora de la madrugada por las estaciones climáticas, adicionando el inconveniente de que la temperatura obtenida a través del LST son las correspondientes a la superficie y, la obtenida por la estación climatológica es la del aire.

Los resultados de este trabajo demostraron que es *factible* realizar un enfoque multitemporal para caracterizar una zona espacialmente y entregar así una coherencia temporal acerca de la aparición de las heladas (*análisis histórico y futuro*) del clima, ver Figura 2.12.

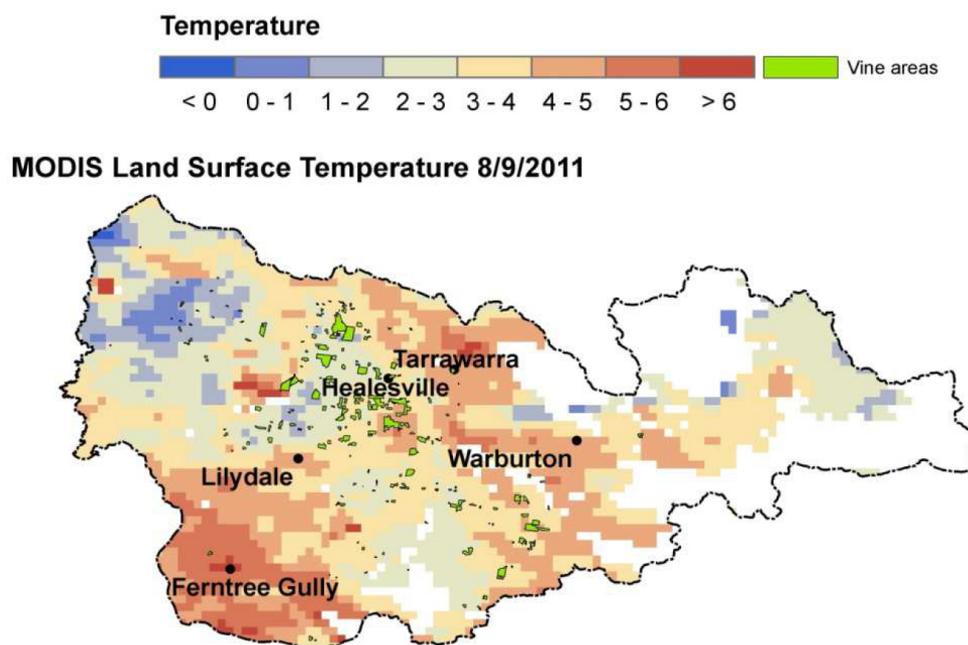


Figura 2.12: Representación de una imagen Aqua MODIS LST sobre el valle de Yarra, las áreas blancas corresponden a zonas del valle cubierto por nubes

Fuente: Understanding Frost Risk in a variable and Changing Climate, S.Crimp *et al.*, 2013.

Kotikot y Onywere (2015), establecen a las heladas como un peligro agrícola común dentro de las regiones de Kenia, las cuales dieron lugar a enormes pérdidas para los agricultores debido a los daños en sus cultivos. Esto se ve agravado principalmente por la falta de información adecuada de los agricultores sobre las heladas para amortiguar y tomar de decisiones acertadas en caso de pérdidas.

Esta investigación, se inicia en el Departamento de Planificación Ambiental y Administración de la Universidad de Kenia, en el cual se construyó una *mapa de puntos*, en donde se identificaron los principales focos donde ocurren heladas dentro de una determinada región (*monte Aberdares*), además, de buscar la identificación de la extensión de las tierras de cultivo en riesgo de daños por heladas, ver Figura 2.13.

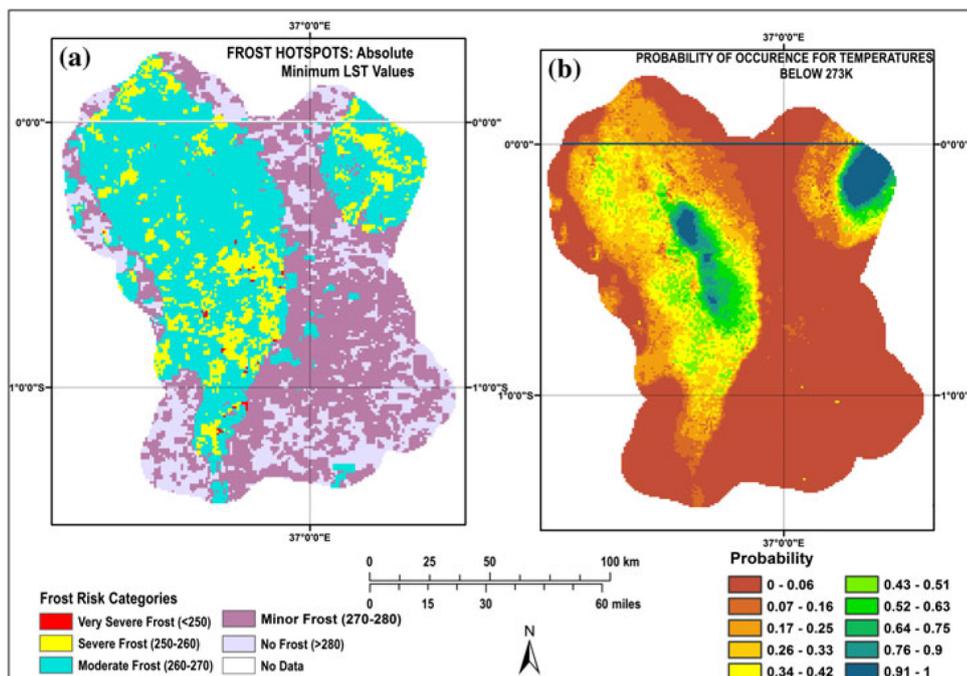


Figura 2.13: Categorización de riesgo de heladas y frecuencia de ocurrencia de temperaturas inferiores a 0 °C, concentradas en la región de Aberdares y monte de Kenia

Fuente: Susan Malasao Kotikot (2014).

Asimismo, se estableció la tendencia de apariciones mínimas de temperatura dentro de la región con el fin de identificar patrones existentes en las ocurrencias de heladas a partir del año 2000-2013, en donde los valores mínimos de temperatura fueron extraídos de bases de datos mensuales MODIS LST, para lo cual se utilizó el software ENVI 4.7 y el método de clasificación "Decision Tree", en donde el riesgo de heladas se clasificó como:

- a) heladas graves (< 250K)
- b) helada severa (250K - 260K)
- c) heladas moderadas (260K - 270K)
- d) heladas menores (270K - 280K)
- e) áreas sin heladas (> 280K)

Las heladas tendieron a concentrarse hacia el contorno del monte Aberdares. Estas heladas, se obtuvieron mediante un análisis de series temporales de temperaturas mínimas mensuales, las que mostraron patrones recurrentes de sucesos mínimos de temperatura en los meses de abril, mayo, julio, agosto y noviembre.

El estudio propone *la adopción de cultivos resistentes y el uso de medidas de protección manuales*, de igual manera, la selección del sitio basado en la susceptibilidad de los cultivos, consideración de la curvatura de la superficie terrestre con el fin de evitar pérdidas y garantizar la máxima producción de cultivos.

Simões y Fontana (2015), el sur de Brasil presenta una gran ocurrencia de heladas, la cual provoca graves pérdidas en la agricultura, sobre todo debido a aquellas denominadas "heladas tardías", que ocurren durante la primavera, siendo el trigo, el cereal con las mayores pérdidas registradas.

El problema surge debido a la insuficiente distribución de estaciones climáticas (*estimación de temperaturas mínimas del aire*), por lo cual, se abordó como metodología el uso de imágenes del sensor MODIS abordo del satélite Aqua como estimador para la presencia de heladas (*producto MYD11A1*) durante el periodo de junio a agosto, desde el año (2006-2012), y adicionalmente se utilizaron datos de estaciones meteorológicas convencionales del Instituto Nacional de Meteorología (INMET).

Se observó concordancia entre los datos medidos de *temperaturas* mínimas de las estaciones meteorológicas y los datos obtenidos a través de MODIS.

Según los resultados, LST debajo de 3 °C registrados por Aqua/MODIS son una indicación de un escenario favorable a la *ocurrencia de heladas*.

La importancia del tema radicó principalmente en generar futuros estudios que sirvan de base para minimizar los riesgos de pérdida en la agricultura y tener identificadas las zonas de riesgo climático y poder generar alertas a un plazo de 48 horas antes del evento.

3.1. Antecedentes Generales

La región de Valparaíso, cuya capital administrativa es la ciudad de Valparaíso, está ubicada en la zona central de Chile, la cual se enmarca desde los 32°02' y 33°57' latitud sur, hasta los 70°00' y 72°00' longitud oeste, hasta el Océano Pacífico, incluyendo las Islas Esporádicas (*Isla de Pascua, Salas y Gómez, San Félix, San Ambrosio y Archipiélago Juan Fernández*), ver Figura 3.1.

La superficie regional continental es aproximadamente 16 378 km², el cual representa el 2,16 % del territorio nacional (CONAF, 1997).

La región de Valparaíso, está caracterizada por ser una zona de transición, desde el punto de vista morfoestructural, ya que se presentan las últimas manifestaciones de los valles transversales del norte Chico, como son los ríos Petorca y La Ligua, igualmente no se presentan con claridad las unidades físicas orográficas que caracterizan al país, especialmente el *valle longitudinal* o la *depresión intermedia*, que aparece reemplazada por una serie de *cuenclas tectónicas* al pie occidental del cordón andino. En esta región terminan los *valles transversales*, los cuales otorgan paso a los denominados *valles longitudinales*. La región posee un clima templado de tipo *mediterráneo*, pero con algunas variaciones. Así como la semiaridez se presenta hacia el norte del río Aconcagua, es más húmedo o *mediterráneo costero* en el litoral y *frío de altura* hacia la cordillera (BCN, 2016).

Como resultado de su relieve diverso y condiciones climáticas, se desarrollan en esta región ecosistemas y ambientes que sustentan una alta biodiversidad y con un alto grado de endemismo. Esto, sumado a las presiones derivadas de los usos antrópicos del territorio, llevaron a considerar la zona central y centro sur de Chile como uno de los puntos calientes para la conservación de importancia internacional (Arroyo *et al.*, 2008).

En efecto, a esta región de nuestro país se le considera como el comienzo de los límites de la denominada zona “*heladas tardías*”.

3.1 ANTECEDENTES GENERALES

La región de Valparaíso está completamente afectada a la ocurrencia de heladas. El periodo libre de ocurrencias de heladas disminuye de norte a sur y de este a oeste. En la costa, este periodo dura entre 11 y 9 meses, disminuyendo al ascender las laderas de la cordillera de la Costa; en el sector de valles transversales varía entre 10 y 6,5 meses y en el sector cordillerano andino alcanza a sólo 6 meses (Cárdenas Gasmuri *et al.*, 1989).



Figura 3.1: Ubicación geográfica de la región de Valparaíso - Chile

Fuente: DIVA-CIREN, a escala 1:10 000, 2008.

3.1 ANTECEDENTES GENERALES

La provincia de San Felipe de Aconcagua, se ubica en la latitud 34°45' sur y longitud 70°43' en el sector este de la región de Valparaíso, separada de la cuenca de Santiago por el cordón de Chacabuco, alrededor del río Aconcagua.

La provincia limita al norte con la provincia de Petorca, al este con la provincia de Los Andes y la República Argentina, al sur con la región Metropolitana y al oeste con la provincia de Quillota. Aquí se encuentra el último de *los valles transversales* de la zona norte de Chile, transición entre el norte Chico y el Chile Central.

Esta provincia, está compuesta por las comunas de San Felipe (*capital provincial*), Llay Llay, Catemu, Panquehue, Putaendo y Santa María, con una extensión de 2 659 km² y una población según el censo de 132 000 habitantes, de los cuales el 27,4% corresponde a población rural y el 72,6% a población urbana, ver Figura 3.2.

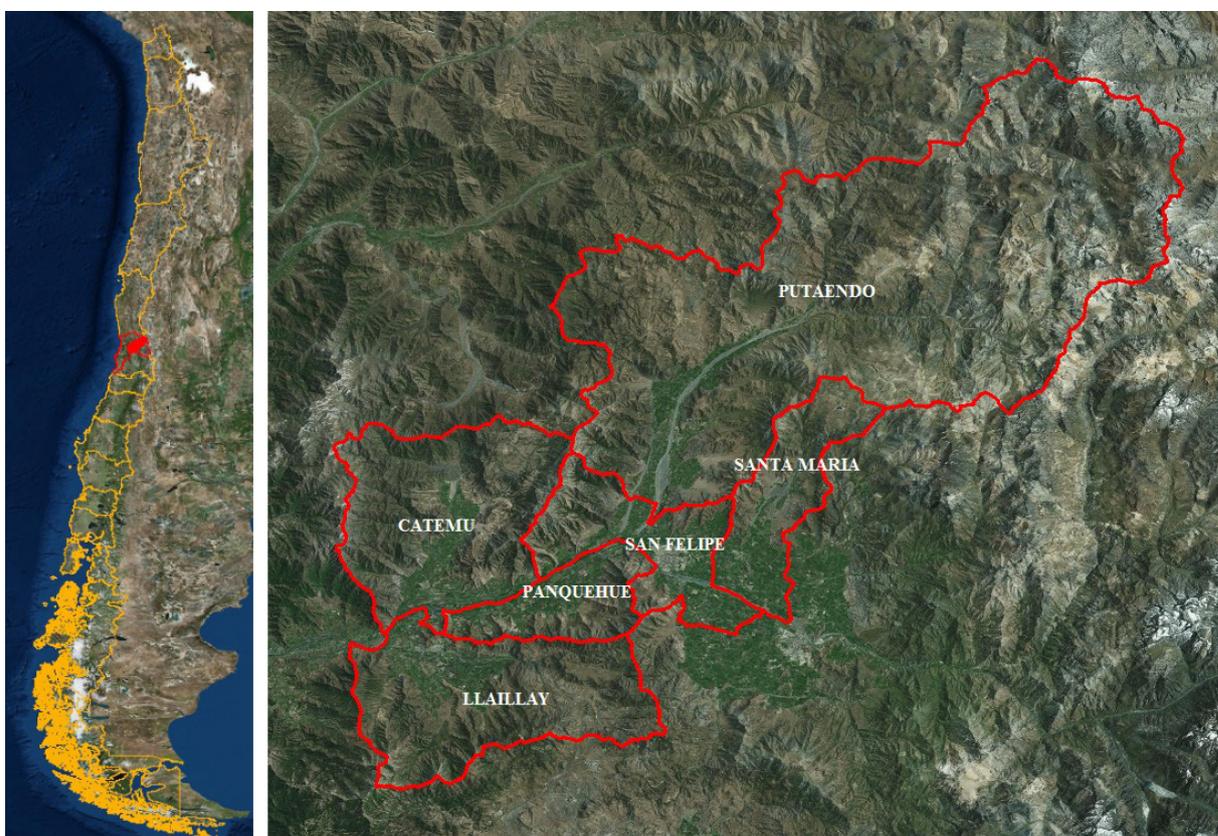


Figura 3.2: Provincia de San Felipe del Aconcagua, región de Valparaíso - Chile

Fuente: DIVA-CIREN, a escala 1:10 000, 2008.

3.2. Perfil Ambiental

Chile, posee uno de los gradientes climáticos más pronunciados en el mundo, que se extiende desde el desierto más seco del planeta en la parte norte del país, donde la precipitación se mide en milímetros por década, hasta llegar a la región de los canales y fiordos en el sur de la Patagonia, donde la lluvia puede tener un promedio de hasta siete metros por año o más. En contraste, zonas de separación térmica mediante el Océano Pacífico contribuye a mejorar las temperaturas extremas, lo que genera un gradiente de temperatura latitudinal que es considerablemente menos pronunciada que en todos los rangos latitudinales similares en otras partes del mundo (Miller, 1976).

Debido a su aislamiento geográfico por millones de años inducido por la enorme barrera impuesta por la Cordillera de los Andes, el país posee hoy una fauna y flora altamente endémica, cuya distribución está estrechamente vinculada a estos gradientes (Hinojosa y Villagrán, 1997).

Al considerar su posición geográfica y el ambiente tectónico, no es sorprendente que la geomorfología de Chile sobre todo los últimos dos millones de años (*periodo Cuaternario*), haya sido influenciada fuertemente por el clima y este amplio gradiente latitudinal (Gradstein *et al.*, 2004), ver Figura 3.3.

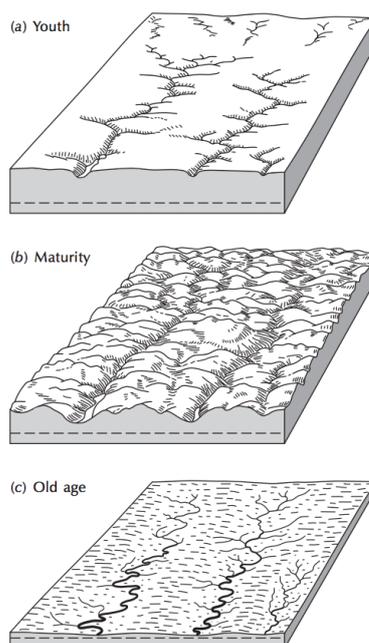


Figura 3.3: Ciclo geomorfológico evolutivo
Fuente: Principles of Physical Geology, Holmes (1965).

3.2 PERFIL AMBIENTAL

Al igual que el norte Chico, la zona central del país ($32 - 35^{\circ}$ sur), ocupa una posición de transición entre dos fenómenos principales que caracterizan la costa occidental de América del Sur, en este caso el Anticiclón del Pacífico Sur (SPA) y el Cinturón de Vientos del Oeste (SWW).

El régimen climático variable de esta región, está relacionada a los cambios en la fuerza y posición del SPA. Durante el verano austral, este centro de alta presión se encuentra en un amplio rango latitudinal de América del Sur que bloquea el flujo de masas de aire húmedo que se mueve a través del Océano Pacífico, lo que deja al centro de Chile completamente seco (Aceituno, 1990).

Por el contrario, el anticiclón se debilita y se mueve hacia el Ecuador, permitiendo de este modo tormentas ciclónicas y sistemas frontales que avanzan hacia el centro de Chile. Un componente importante de la variabilidad interanual de la precipitación y por ende un factor que podría tener incidencia en la mayor o menor ocurrencia de heladas en la zona de estudio, está vinculada a El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) (Rutllant y Fuenzalida, 1991), ver Figura 3.4.

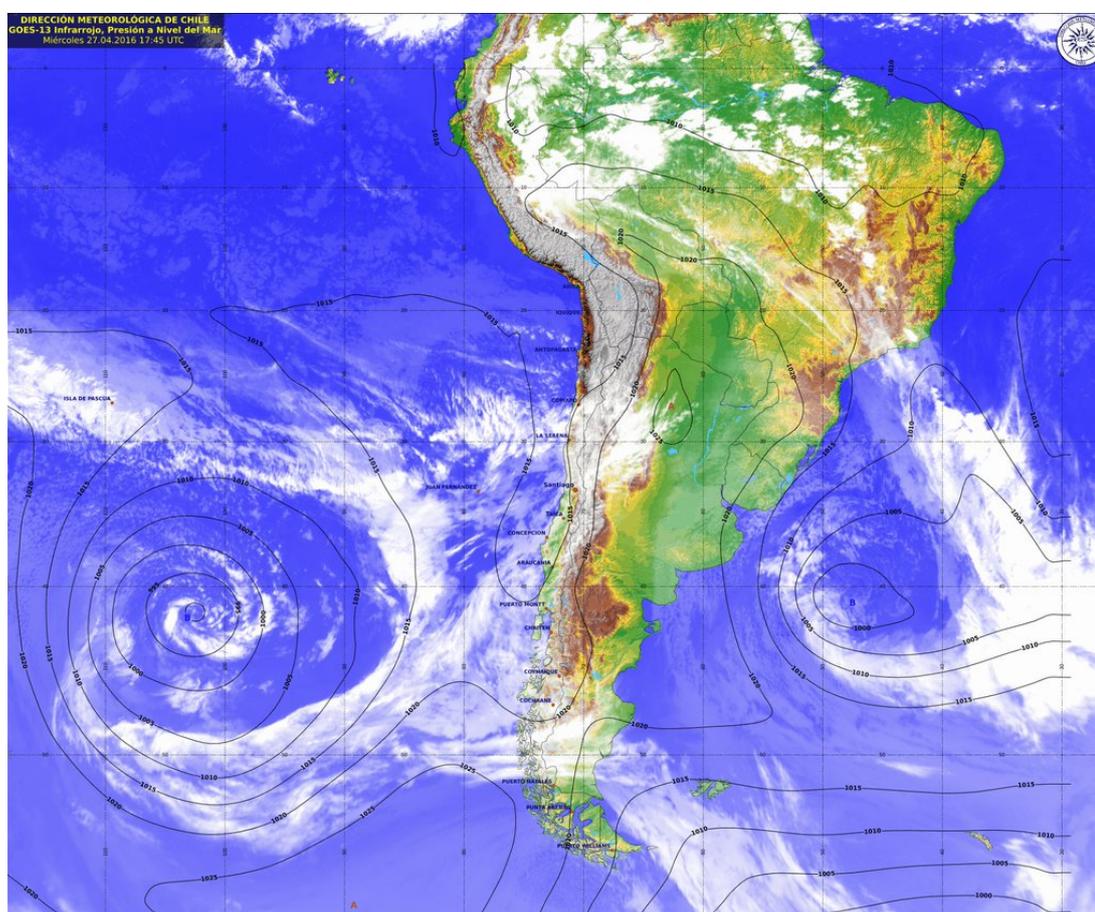


Figura 3.4: Carta sinóptica de un sistema frontal

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile.

Durante los años del fenómeno de *El Niño*, el debilitamiento del anticiclón y la disminución de afloramiento de aguas frescas del Océano Pacífico a lo largo de la costa oeste de América del Sur, son factores que conducen a grandes aumentos de precipitaciones en toda la región de clima mediterráneo de Chile (*región de Valparaíso*).

Durante los años del fenómeno de *La Niña* cuando el SPA es fuerte, la precipitación disminuye muy por debajo de la media, sobre todo en la parte norte de la región mediterránea. Estos episodios pueden extenderse incluso hasta el límite sur más húmedo de la región, lo que causa sequías durante el verano y fuertes heladas en primavera (Holmgren *et al.*, 2001).

Dado lo anterior, es que la región presenta zonas geomorfológicas y climáticas diversas. Es por ello, que para la caracterización de su sistema natural, se ha dividido la región de Valparaíso en cinco zonas, siguiendo principalmente criterios geomorfológicos y fisiográficos, que determinan a su vez las variaciones climáticas.

Estas zonas geomorfológicas y climáticas son las siguientes:

- a) El sistema montañoso semiárido.
- b) El sistema de cuencas menores.
- c) El borde costero.
- d) El sistema de montaña andino.
- e) La cuenca del río Aconcagua.

Identificadas las zonas, se otorgó mayor relevancia a *la cuenca del río Aconcagua*, por encontrarse en este lugar, las estaciones meteorológicas utilizadas e información actualizada del *catastro frutícola*, ver Figura 3.5.

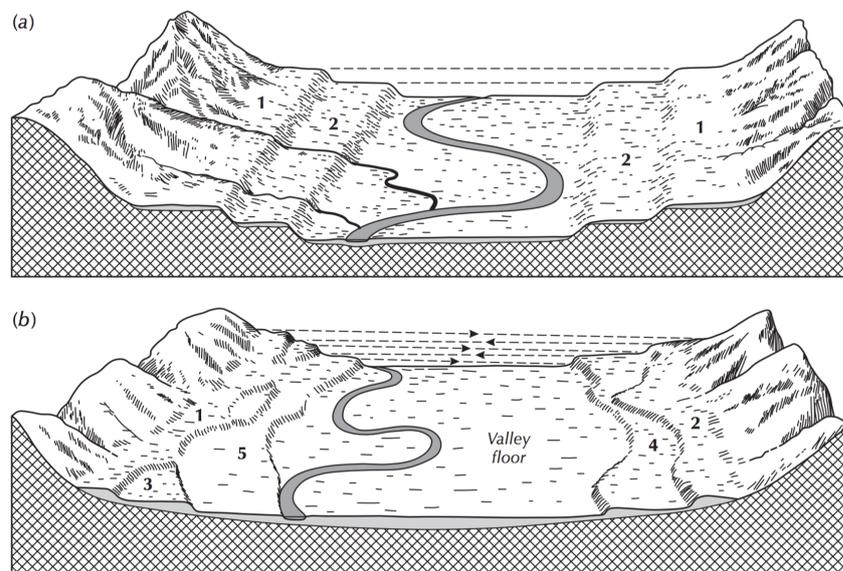


Figura 3.5: En la zona de la cuenca del Aconcagua, se pueden encontrar ambos tipos de formación de terrazas, aptas para el desarrollo de la agricultura de la zona

Fuente: Adaptado de Sparks (1960) y Thorbury (1958).

3.2.1. La Cuenca del río Aconcagua

Desde el punto de vista geológico y geomorfológico, la cuenca del río Aconcagua posee *tres* dominios morfoestructurales que hacen de la región, áreas climáticas bien diferenciadas.

El *dominio morfoestructural superior*, corresponde a la cabecera de la cuenca, que va desde la Cordillera de los Andes hasta la falla tectónica de Pocuro.

El *dominio morfoestructural medio*, va desde la falla Pocuro hasta el valle tectónico del estero Rabuco - estero El Melón.

El área de estudio se sitúa dentro de este dominio, el que se caracteriza por formaciones originadas en el *cretácico inferior*, lo cual abarca gran parte del dominio que corresponde a la formación Las Chilcas, la formación Veta Negra y la formación Lo Prado, y del *cretácico superior* al norte de Putaendo, que corresponde a la formación Viñitas.

El *dominio morfoestructural inferior*, va desde el valle tectónico de los esteros Rabuco y El Melón hasta la desembocadura del río Aconcagua. Se caracteriza por formaciones del periodo Jurásico, Jurásico/Triásico y del Cretácico superior e inferior.

A continuación, se muestra un perfil topográfico de la subcuenca del río Aconcagua, donde se obtuvieron significativas diferencias de alturas a las cuales está sometida la cuenca y algunas estaciones meteorológicas, ver Figura 3.6.

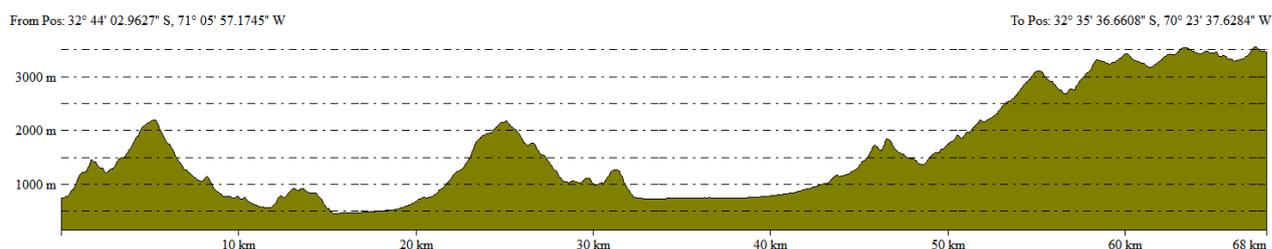


Figura 3.6: El perfil topográfico de la subcuenca del Aconcagua en el área de estudio muestra importantes diferencias de altura, superando los 3 500 m de altura

Fuente: Aster Global Digital Elevation Map v2.

3.2 PERFIL AMBIENTAL

El clima de la cuenca es *templado cálido*, no obstante, las temperaturas varían entre la zona litoral y el interior. En la montaña, las temperaturas son más elevadas que en el litoral, pero las temperaturas mínimas no difieren mayormente. En verano, las temperaturas son elevadas, especialmente en las áreas más cerradas del valle, como en las localidades de Los Andes y Llay-Llay.

Desde la cordillera provienen masas de aire cálidas pero secas, que aumentan la temperatura del interior por sobre los 34 °C.

En invierno, entre los meses de mayo y octubre, la región se ve afectada por masas de aire frío y húmedo de origen polar. En el interior, las bajas temperaturas se acentúan, las cuales alcanzan los -6 °C (*teniendo una tendencia alta de ocurrencias de heladas*), siendo precisamente la zona de estudio el lugar donde se presenta con mayor ocurrencia dicho fenómeno meteorológico.

La cuenca muestra diferencias climáticas a medida que va descendiendo hacia la costa.

Los sectores del interior como las comunas de Los Andes, Santa María, Calle Larga, San Felipe y Rinconada presentan mayor amplitud térmica, menor humedad y menos precipitaciones, respecto a las zonas menos continentales de Llay-Llay, Catemu y Panquehue.

Los vientos de la cuenca muestran en otoño e invierno, una dirección suroeste durante los meses de septiembre a marzo. En tanto, la dirección cambia a noroeste, la cual alcanza una velocidad mayor, durante el periodo primavera - verano. En las zonas en que la cuenca es de mayor longitud, el viento es mayor, por ejemplo Llay-Llay, ver Figura 3.7.

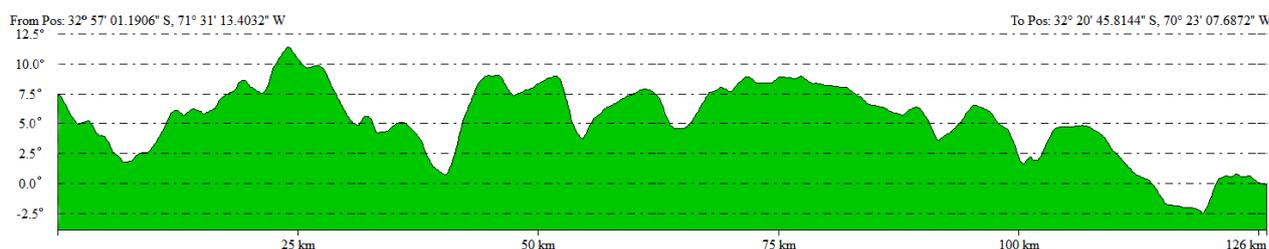


Figura 3.7: Perfil de temperatura de superficie desde el litoral hasta la cordillera de Los Andes, región de Valparaíso

Fuente: Aqua/MODIS MYD11A1-V5.

La cuenca de este río tiene una superficie aproximada de 7 640 km^2 , en donde el curso superior se considera hasta la comuna de Los Andes.

Según las capacidades de uso del suelo, se pueden identificar *cuatro* sectores en la zona del valle del Aconcagua contiguos a la cuenca:

1. Este sector corresponde a la zona del curso superior del río Aconcagua, en las zonas de San Felipe, Los Andes, San Esteban, Santa María, Calle Larga y Rinconada. Se caracteriza por una adecuada disponibilidad de agua de riego, con suelos de buena calidad y ocupados principalmente por plantaciones frutales, ver Figura 3.8.
2. Este sector corresponde al Valle de Putaendo, con suelos de inferior calidad y con menor disponibilidad de agua para riego, lo que limita la actividad agrícola. En esta zona se practica principalmente la ganadería extensiva.
3. Este sector corresponde al curso medio del río Aconcagua, en las zonas de la comuna de Cate-mu, Llay-Llay y Panquehue presenta una menor proporción de suelos cultivables.
4. Por último, el curso inferior del río Aconcagua corresponde al cuarto sector, en las zonas de Olmué, Limache, Quillota, La Cruz y Concón. Los suelos son de mediana calidad. El mayor desarrollo lo alcanza la fruticultura de hoja persistente y la horticultura en las zonas en que los suelos tienen mayores limitaciones, en los suelos de secano se desarrolla la ganadería.

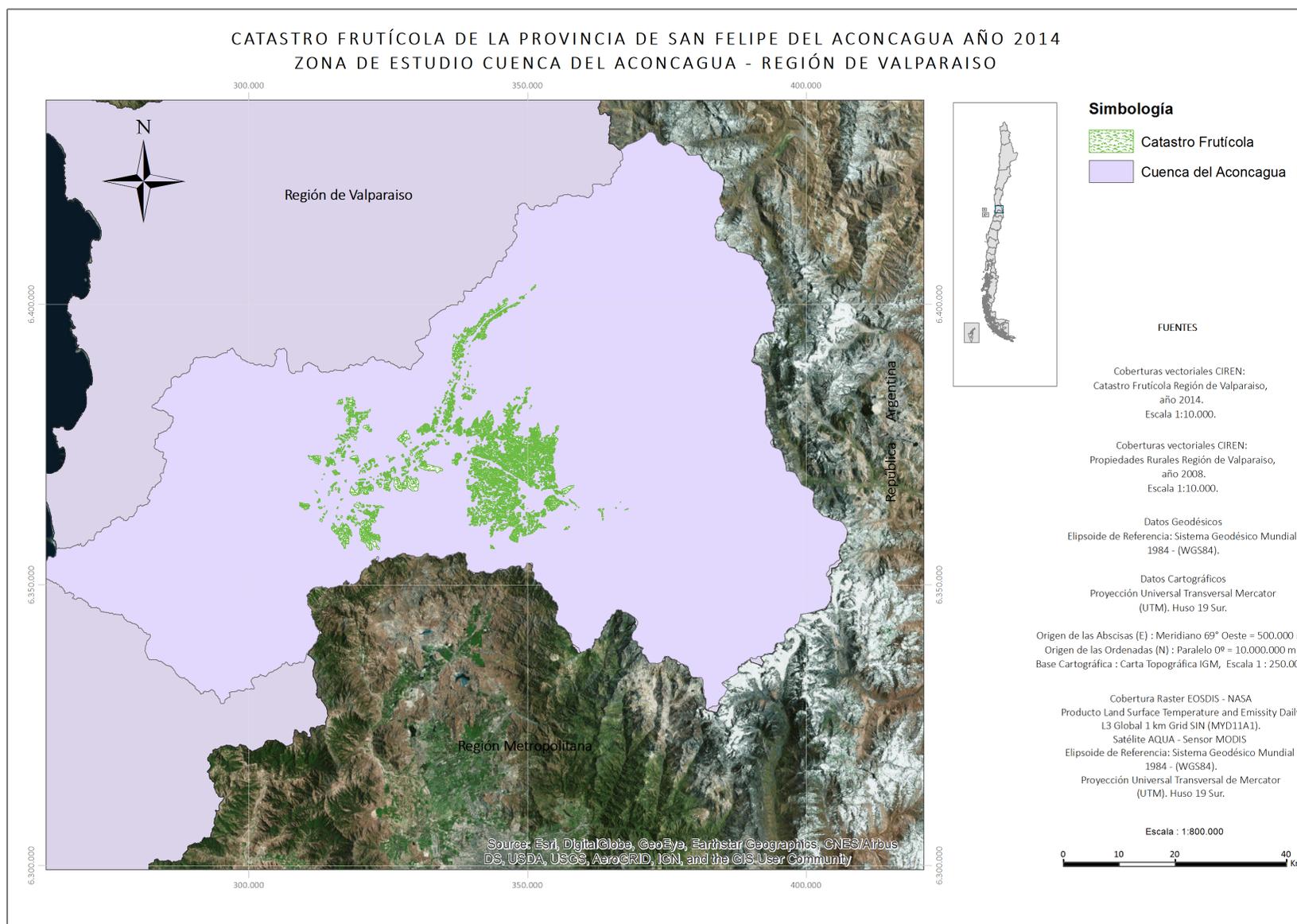


Figura 3.8: En este sector de la cuenca superior del Aconcagua se encuentra gran parte del catastro frutícola de la provincia de San Felipe de Aconcagua

Fuente: Catastro Frutícola - Ciren, a escala 1:10 000, 2014.

4.1. Las Imágenes Ópticas

La observación remota es posible gracias a la interacción de un flujo energético, de la radiación electromagnética con elementos de la superficie de la Tierra (Gutiérrez y Nieto, 2006).

Este flujo energético que transporta un fotón se puede calcular utilizando a la Teoría Cuántica, formulada por *Planck* en el año 1900.

$$E = h * f, \quad (4.1)$$

donde:

E = Cantidad de energía transportada por un fotón (*Julios*)

h = Constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J s)

f = Frecuencia (*Hercios*)

A mayor *frecuencia* menor *longitud de onda*, por este motivo, es que será mayor la cantidad de energía transportada por la radiación electromagnética y viceversa.

Este flujo, presenta comportamientos que pueden explicarse por la teoría de *Huygens/Maxwell*, que la concibe como un haz ondulatorio y, la teoría de *Planck/Einstein*, que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, cuantos y fotones, con masa igual a cero (Bustos, 2012).

A partir de estas teorías, se puede definir a cualquier tipo de energía radiante en función de su *longitud de onda* y *frecuencia* organizadas en bandas que definen el espectro electromagnético (Chuvieco, 1996), ver Figura 4.1.

4.1 LAS IMÁGENES ÓPTICAS

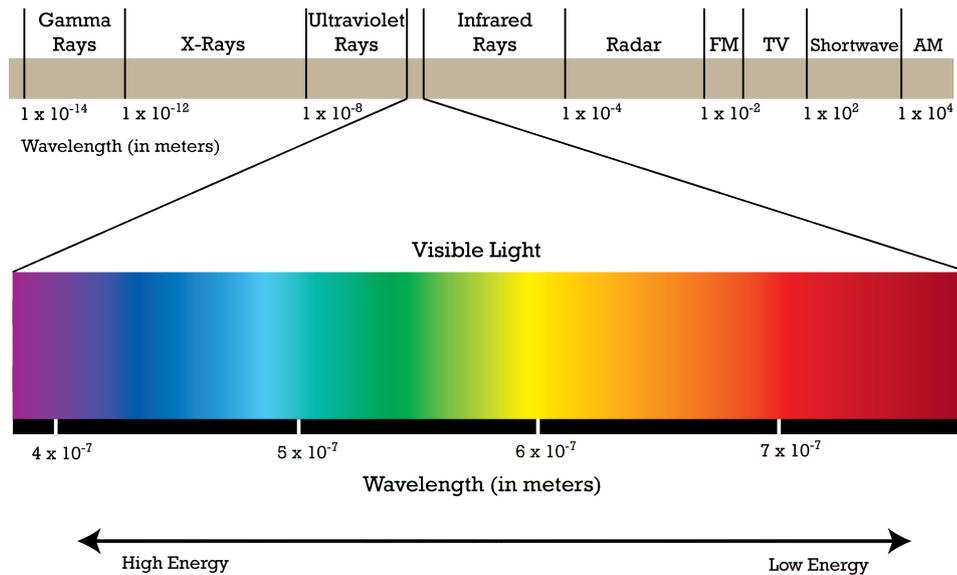


Figura 4.1: El espectro electromagnético

Fuente: <http://www.pion.cz/en/article/electromagnetic-spectrum>

La propagación de la radiación electromagnética está ligada a ciertos fenómenos físicos múltiples tales como la atenuación con la distancia, la absorción, la refracción, la reflexión, las interferencias, la difracción, la polarización y la dispersión, entre otros (Pérez, 2006).

No obstante, para la teledetección la parte que nos interesa es *la energía reflejada* por los objetos de la superficie y la radiación infrarroja, que será la que llegue al sensor y se empleará para generar la imagen. Una *imagen* de varias bandas, contiene información sobre la intensidad de la radiación reflejada en distintos rangos del espectro electromagnético (Olaya, 2011).

4.1 LAS IMÁGENES ÓPTICAS

La *reflectancia* se definirá como la parte de la irradiancia que refleja la superficie receptora, se mide en *tantos por uno* o porcentajes entre 0 a 100% y se considera por tanto *adimensional*. Es diferente para cada superficie receptora y para cada cuerpo (Meliá, 1991).

Para una determinada superficie, este parámetro varía en función de la *longitud de onda*.

Al gráfico de la reflectancia espectral frente a la longitud de onda se le denomina *curva de reflectancia espectral* o *firma espectral*, ver Figura 4.2 y Figura 4.3.

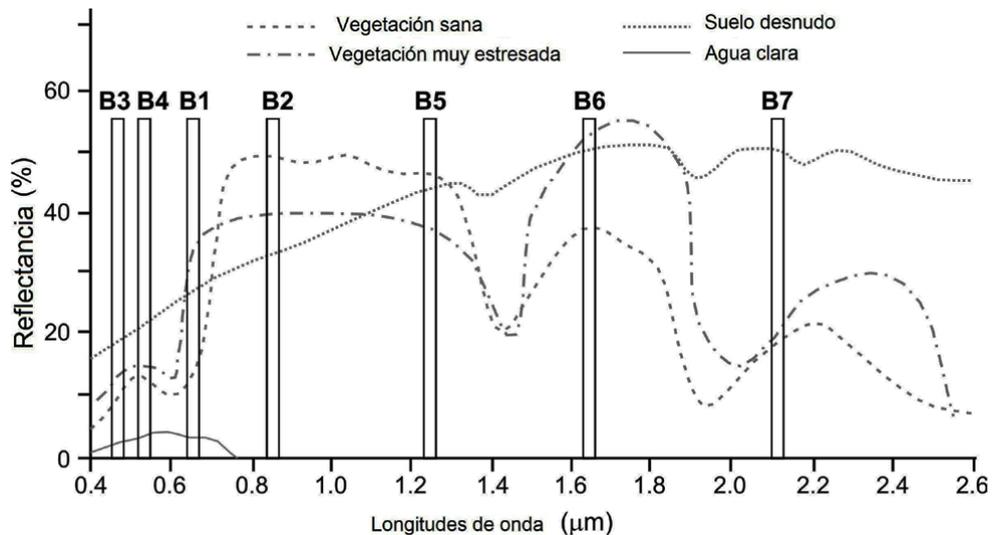


Figura 4.2: Longitudes de onda de las siete primeras bandas del sensor MODIS

Fuente: Sociedad Geológica mexicana, 2004.

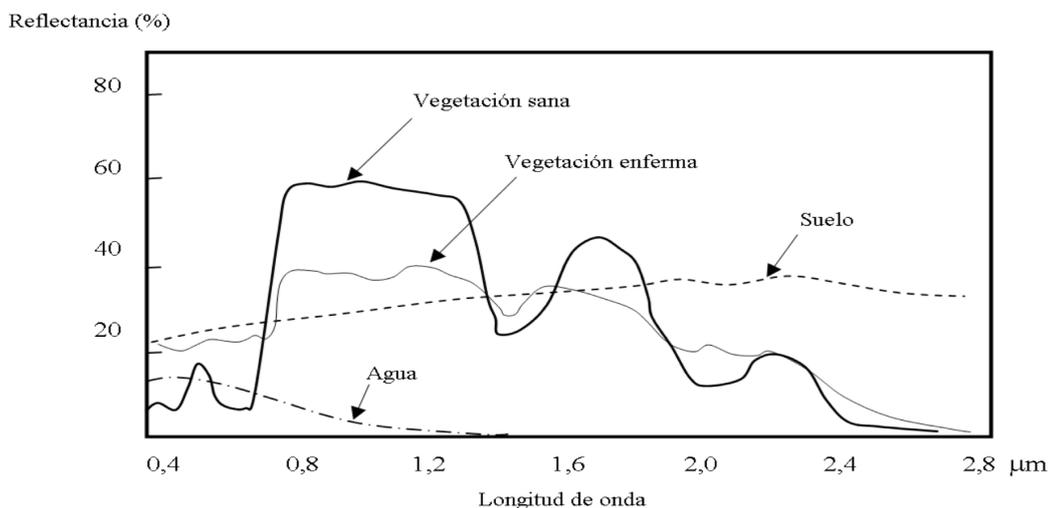


Figura 4.3: Firmas espectrales típicas para vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo reflejado del espectro electromagnético

Fuente: Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje – Facultad de Ciencias Forestales, 2009.

4.1.1. Tipos de Resolución

La definición de los valores de cada una de las resoluciones depende fundamentalmente del objetivo para el cual el sensor fue construido, la capacidad de transmisión y almacenamiento de información a estaciones receptoras. A continuación se definen cada una de estas *resoluciones*.

a) Resolución Espacial

Es la propiedad que recibe mayor atención al momento de elegir una imagen, pues determina el nivel de detalle con que puede ser visualizada la superficie retratada en ella, que se define por el tamaño de lado del píxel (*celda regular mínima de información en un archivo de datos raster*). No obstante, la verdadera importancia de la resolución espacial radica en la posibilidad de extraer datos espectralmente puros desde una imagen. En efecto, si la superficie de un píxel está compuesta en su totalidad por el objeto de interés, entonces la radiación medida en él será “pura”, pues corresponderá a un único objeto (Borengasser *et al.*, 2007), ver Figura 4.4.



Figura 4.4: Distintas resoluciones espaciales

Fuente: <https://geoservice.igac.gov.co>

b) Resolución Temporal

Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, lo que equivale al periodo de tiempo entre distintas pasadas del satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita y del ancho de barrido en cada pasada. Es un valor de gran importancia a la hora de seleccionar el sensor que se va a utilizar como origen de los datos, pues en el caso de intentar estudiar fenómenos con una variabilidad temporal alta, puede no ser adecuado. Así, el rango de valores de resolución temporal disponibles en la actualidad, oscila entre unos pocos minutos en el caso de satélites meteorológicos, hasta los 16 días del sensor TM (Palomo, 2012).

c) Resolución Radiométrica

Se define como el nivel de cuantificación de radiación en las bandas de la imagen. Mientras más valores de radiación son medidos en las bandas, más probabilidades existen de distinguir diferencias entre las señales que produce un objeto a lo largo de ellas. Así, aunque una imagen cuente con una excelente resolución espectral, si los niveles de radiación de sus bandas son groseramente medidos, será difícil identificar señales de reflexión o absorción lo suficientemente precisas como para caracterizar y discriminar numerosos objetos (Aronoff, 2005).

d) Resolución Espectral

Es la capacidad del sensor para discriminar la radiancia detectada en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Está determinada por el número de bandas que el sensor puede captar y por la anchura espectral de éstas. En términos generales, el sensor será de mayor utilidad cuanto mayor sea el número de bandas que proporcione, ya que algunas cubiertas requieren estudios multispectrales. Por otro lado, conviene que el ancho de cada banda sea lo más reducida posible, con el objeto de no obtener valores medios de regiones espectrales de diferentes significación física. Algunos sensores discriminan el espectro en tres bandas mientras que los hiperespectrales oscilan alrededor del centenar (Tristan *et al.*, 2005), ver Figura 4.5.

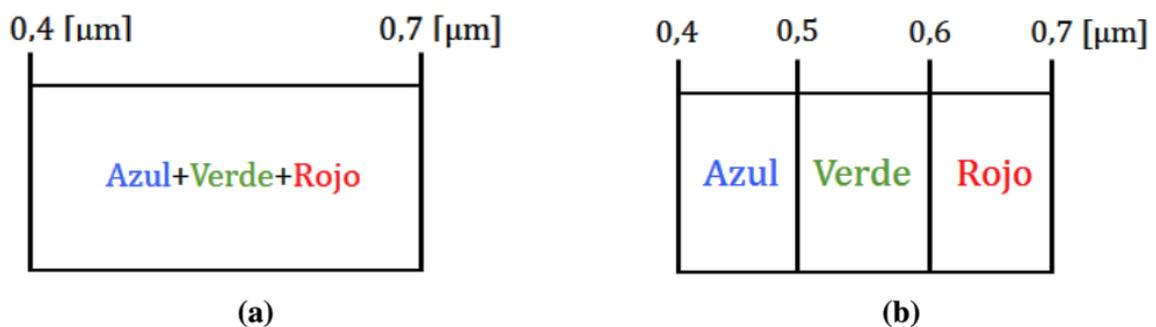


Figura 4.5: Diferencias entre (a) una sola banda que no discrimina colores (pancromática) y (b) una película a color que discrimina mayor número de bandas.

Fuente: Fundamentals of Remote Sensing, CCRM(2014).

En los sensores ópticos, las imágenes creadas por los sistemas de *percepción pasiva* son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la cual existe evaluación de los recursos naturales. Los sistemas pasivos simplemente reciben las señales emitidas naturalmente y reflejadas por los objetos percibidos. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, pueden proveer una información muy detallada sobre los objetos percibidos (Martínez y Díaz, 2005).

4.2. El Satélite Aqua, sensor MODIS

Para el desarrollo del tema “Propuesta metodológica para el diseño de un sistema de alerta de heladas en base a datos satelitales, de superficie y modelados” para la provincia de San Felipe de Aconcagua, región de Valparaíso – Chile, se utilizaron imágenes del sensor MODIS, producto MYD11A1, el cual va montado como instrumento dentro de los satélites Terra (*EOS AM*) y Aqua (*EOS PM*), financiados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Kaufman *et al.*, 1998).

La órbita del satélite Aqua viaja de sur a norte, la cual alcanza nuestro país por la mañana y cubre la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días, ver Figura 4.6.

Estos datos ayudan a comprender la dinámica global de la Tierra; el comportamiento en la superficie terrestre, en los océanos y en la atmósfera.

El sensor MODIS ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de modelos validados y globales capaces de predecir el cambio global que está sufriendo el planeta Tierra, los cuales sirvieron para tomar decisiones sanas referentes a la protección de nuestro ambiente. Los datos del satélite Aqua alcanzan más de 400 terabytes repartidos en más de 40 productos (Barnes *et al.*, 2002).

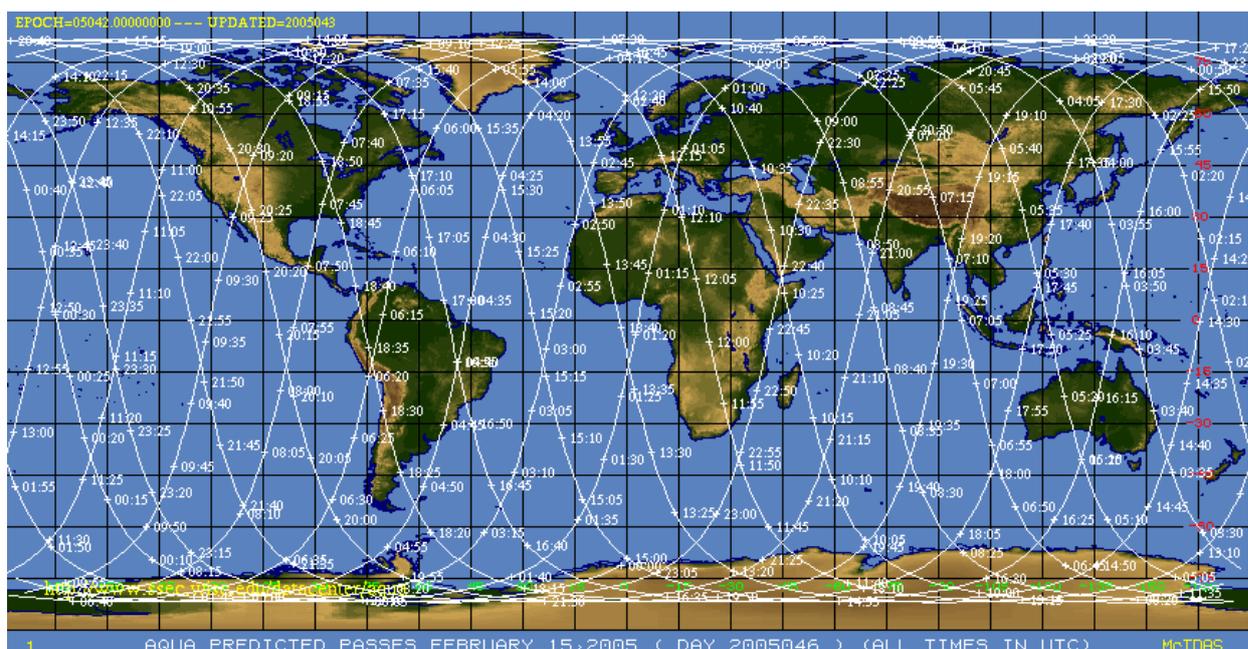


Figura 4.6: Cobertura diaria del satélite Aqua/MODIS

Fuente: LP DAAC.

El satélite Aqua, es una plataforma de observación terrestre dedicado al estudio del ciclo del agua (*precipitación y evaporación*), lanzado en mayo del 2002 (Justice *et al.*, 2002).

Cada escena dependerá del ancho del barrido, aproximadamente cubre un área $2\ 330\ km$, los cuales son capturados durante un tiempo estimado de cinco minutos.

Tanto el satélite *Terra* como *Aqua* funcionan en *banda X* a una frecuencia de $8\ 215\ GHz$ y $8\ 160\ GHz$, transmitiendo datos a una tasa de $13\ 125\ Mbps$.

El satélite Aqua lleva a bordo los siguientes instrumentos:

- **CERES** (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*): compuesto por dos radiómetros de banda ancha, del espectro visible al infrarrojo (*bandas entre 0,3 - 5 micras y entre 8 - 12 micras*), miden el balance de radiación terrestre, lo que estima la radiación reflejada y emitida por la atmósfera desde la superficie hasta el tope de la misma. Contiene estimaciones de las propiedades de las nubes tales como la altura, el espesor, la cantidad y el tamaño de partículas (Minnis *et al.*, 2011). Estas mediciones son críticas para entender la predicción del calentamiento global, la cual utiliza modelos climáticos.
- **AIRS**: es un sensor hiperspectral con 2 378 canales (*2-14 km*) de resolución espacial, para realizar perfiles verticales de temperatura y humedad, propiedad de las nubes y flujos de energía radiante y cubre el rango longitudinal de onda entre las 3,7 a 15,4 micras (Broberg *et al.*, 2006).
- **HSB**: “Humidity Sounder for Brazil” es un radiómetro de microondas de cinco canales (*150-183 GHz*), el cual se utiliza para obtener perfiles de humedad en la atmósfera incluso bajo cubiertas de nubes muy espesas y neblina (Parkinson *et al.*, 2000).
- **AMSR-E**: es un radiómetro microondas de 12 canales (*6,9-89 GHz*), seis frecuencias pasivas y seis activas, dependiente de Japón. Proporciona mediciones terrestres, oceánicas y parámetros atmosféricos tales como; la tasa de precipitaciones, la temperatura superficial del mar, la concentración del hielo marino, la humedad del suelo y superficial, la velocidad del viento, el vapor de agua, entre otros (Basist *et al.*, 2000).
- **AMSU**: “Advanced Microwave Sounding Unit” es un radiómetro de microondas de 15 canales que opera entre (*23-89 GHz*), el cual mide la temperatura de la atmósfera y humedad, diseñado para apoyar los requisitos operacionales de medio alcance en la predicción meteorológica de los Centros Nacionales del Océano y la Atmósfera Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) y otros centros de predicción numérica del tiempo (Molnar y Susskind, 2005).
- **MODIS**: es una cámara con espectrómetro en el espectro óptico e infrarrojo (*0,4-14,5 micras*), tiene un swath de 2 330 km, por lo cual montado este sensor tanto en el satélite Terra como en Aqua proporciona una cobertura global casi completa a la Tierra durante el día en 36 bandas espectrales corregistradas con una resolución moderada (*250 metros en dos bandas, 500 metros en cinco bandas y 1 000 metros para las restantes 29 bandas*) y una alta resolución radiométrica (*12 bits*) aplicables a cobertura terrestre, a temperaturas superficiales de la Tierra y océanos, nubes, aerosoles, vapor de agua, perfiles de temperatura e incendios (Savtchenko *et al.*, 2004).

El sensor MODIS es uno de los instrumentos más importantes del satélite, el cual tiene la capacidad de hacer observaciones de la Tierra entre uno y dos días, ver Figura 4.7.



Figura 4.7: El sensor MODIS montado sobre el satélite Aqua
Fuente: El sensor MODIS y sus Aplicaciones Ambientales en Brasil, 2007.

MODIS es un explorador de barrido, contiene un espejo móvil que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria con un ángulo de $\pm 55^\circ$ que permite explorar una franja de terreno (*swath*) a ambos lados de la traza del satélite (Lillesand *et al.*, 2014).

Provee imágenes de alta resolución radiométrica de la radiación reflejada diurna y de la emisión térmica diurna y nocturna, opera continuamente durante el día y la noche. Durante el día colecta datos de todas las bandas y durante la noche sólo las correspondientes al térmico. El instrumento es calibrado periódicamente utilizando tres calibradores internos; el difusor solar, el cuerpo negro y la visión al espacio (Salinero *et al.*, 2006).

El sistema óptico es un telescopio con dos espejos fuera de su eje focal que direccionan la radiación incidente a cuatro sistemas ópticos reflectantes, uno para cada región espectral (*visible, infrarrojo cercano, medio y térmico*).

De esta forma, es que en el sensor MODIS las primeras 19 bandas están posicionadas en la región del espectro electromagnético situado entre 400 nm y 965 nm de forma que:

- Las bandas de la 1-7 están diseñadas para las aplicaciones terrestres.
- Las bandas 8-16 están diseñadas para observaciones oceánicas.
- Las bandas 17-19 para las mediciones atmosféricas.
- Las bandas 20-36 que cubren la porción térmica del espectro, miden la temperatura de la superficie terrestre, útil para detecciones de calor por incendios o erupciones volcánicas, entre otras (Running *et al.*, 1994).

Para las bandas del *visible* y del *infrarrojo cercano* se utiliza una nueva tecnología de fotodiodos de Silicio.

Para el *infrarrojo térmico* se usan detectores de telurito de Mercurio-Cadmio (*HgCdTe*).

Desde marzo del año 2000, el satélite Aqua transmite continuamente los datos del sensor MODIS hacia las estaciones de recepción terrestres.

En estas estaciones terrestres, los datos obtenidos por el sensor MODIS son divididos en seis niveles (0-4); dependiendo del grado de procesamiento realizado estos son:

- Nivel 0, son los datos brutos sin ningún procesamiento.
- Nivel 1A, son los productos que contienen las 36 bandas utilizadas como datos de entrada para la georreferenciación, calibración y procesamiento.
- Nivel 1B, son los productos que contienen los datos de calibración y georreferenciación para las 36 bandas generadas por el nivel 1A. Datos adicionales incluyen estimaciones de calidad, del error y datos de calibración.
- Nivel 2, son los productos derivados de las radiancias calibradas de productos previos MODIS y son conocidos como niveles 2G (*L2G*).
- Nivel 3, son los productos espacialmente remuestreados y compuestos para un determinado tiempo para producir una estimación de las variables geofísicas para cada grado de localización.
- Nivel 4, son los productos generados por la incorporación de los datos MODIS en modelos, para así, estimar variables geofísicas (Rudorff, 2007).

4.2.1. Datos y Productos

Los datos obtenidos por el sensor MODIS se distribuyen en formato Hierarchical Data Format - Earth Observing System (HDF-EOS), por el Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC), accediéndose a ellos vía interface de descarga o por Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP) (Demcsak, 1997).

Las imágenes utilizan una proyección sinusoidal y la superficie terrestre está dividida en teselas de $10^\circ \times 10^\circ$ (Hall *et al.*, 2002), ver Figura 4.8.

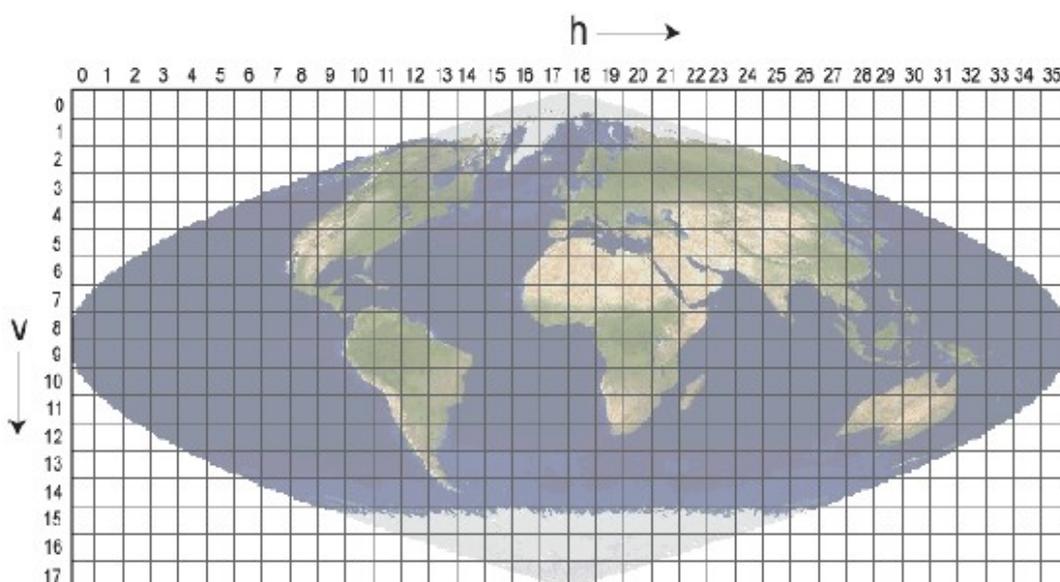


Figura 4.8: Proyección sinusoidal empleada para la distribución de datos MODIS

Fuente: FUENTE: LP - DAAC.

La denominación de los archivos se efectúa según el siguiente esquema de codificación, donde:

X = Satélite, O = Terra, Y = Aqua, C = Mixto.

xxxx = Tipo de producto.

yyyy = Año.

ddd = Día del año, contado a partir del 1 de enero (= 001) en día juliano.

MM = Tesela horizontal.

NN = Tesela vertical.

ccc = Versión del producto.

YYYYOodd = Fecha de producción del archivo.

hhmmss = Hora de producción del archivo.

El resultado es un nombre de archivo como el siguiente,

MYD11A1.A2014121.h12v12.005.2014122220544.hdf

4.2 EL SATÉLITE AQUA, SENSOR MODIS

Esta imagen corresponde al producto MYD11A1, la cual está proyectada sobre una proyección cartográfica sinusoidal, ver Figura 4.9.

Esta imagen fue descargada desde el siguiente sitio:

<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/index.html>

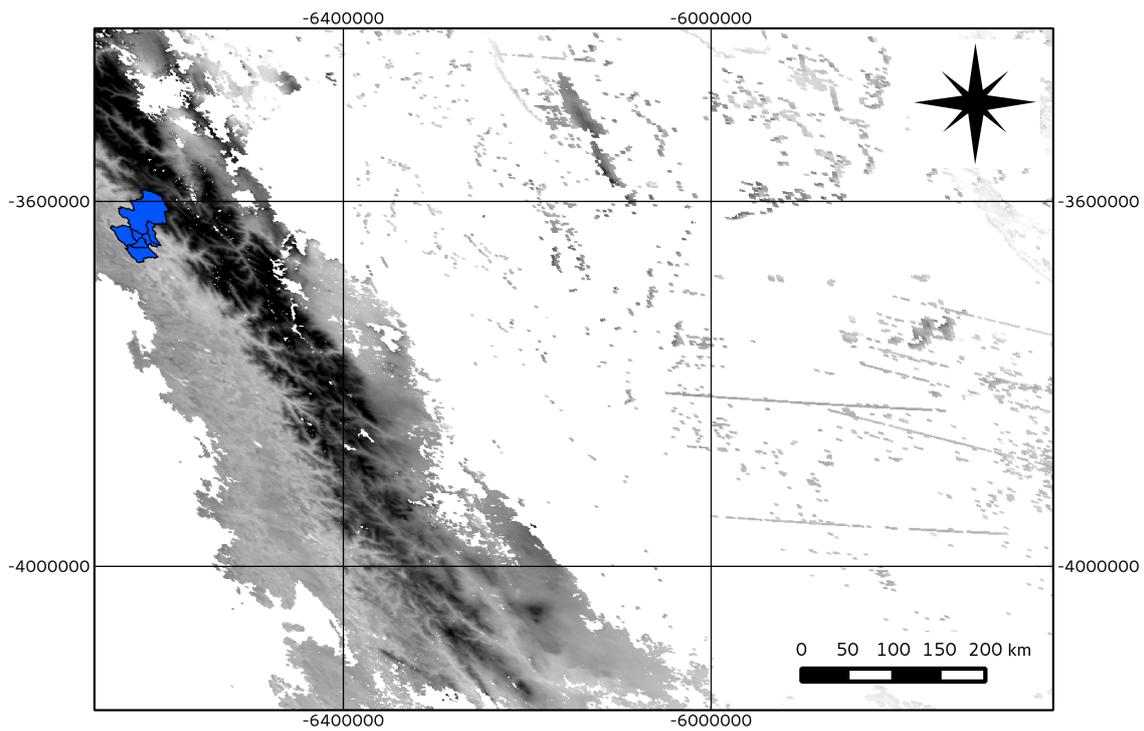


Figura 4.9: El polígono azul corresponde a la provincia de San Felipe de Aconcagua (DIVA-CIREN, 2008)

Fuente: <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/search/index.htm>

El producto MYD11A1 está conformado de la siguiente manera, ver Tabla 4.1.

<i>Aqua Modis MYD11A1-V5 LST/E (1Km)</i>							
SDS	Units	Data-type	Fill Value	Valid Range	Scale factor	A/O	
Daytime LST	Kelvin	16 bit U/I	0	7500-65535	0,02	NA	
Daytime LSTE QC	Bit-Field	8 bit U/I	**	0-255	NA	NA	
Daytime LSTE OT	Hours	8 bit U/I	0	0-240	0,1	NA	
Daytime LSTE VZ	Degrees	8 bit U/I	255	0-130	1	-65	
Nighttime LST	Kelvin	16 bit U/I	0	7500-65535	0	NA	
Nighttime LSTE QC	Bit-Field	8 bit U/I	**	0-255	NA	NA	
Nighttime LSTE OT	Hours	8 bit U/I	0	1-240	0,1	NA	
Nighttime LSTE VZA	Degrees	8 bit U/I	255	0-130	1	-65	
Band 31 Emissivity	None	8 bit U/I	0	1-255	0,002	0,49	
Band 32 Emissivity	None	8 bit U/I	0	1-255	0,002	0,49	
Daytime Clear SC	None	16 bit U/I	0	1-65535	0,0005	NA	
Nighttime Clear SC	None	16 bit U/I	0	1-65535	0,0005	NA	

Tabla 4.1: Conjunto de datos para el producto V5 MYD11A1

Fuente: Aqua Handbook - NASA.

Los productos MYD11A1 brindan estimaciones de la temperatura y de la emisividad de las coberturas terrestres, la temperatura se mide en grados *Kelvin* al contacto entre la cobertura y la atmósfera.

La emisividad, es un número adimensional igual al cociente entre la radiación emitida por un objeto y un cuerpo negro a la misma temperatura. El algoritmo utilizado permite estimar la *emisividad* y la *temperatura* a partir de un par de imágenes diurnas y nocturnas adquiridas en condiciones de cielos despejados utilizando *siete* bandas del infrarrojo medio y térmico (bandas 20, 22, 23, 29, 31, 33) en cualquier tipo de cobertura de suelo (Wan y Li, 1997).

El algoritmo considera el ángulo de observación y el vapor de agua, entre otros. En forma similar, la emisividad se estima al contemplar la cobertura indicada por el producto *MOD12* (Petitcolin y Vermote, 2002).

Para MYD11A1, los productos incorporados con *un* km de resolución por píxel que se producen a diario, utilizan el algoritmo split-window LST generalizado (Wan y Dozier, 1996).

Este algoritmo se utiliza para separar los rangos de la columna de vapor de agua en la atmósfera y las temperaturas del aire más bajas del contorno de la superficie en sub-rangos. Las emisividades de superficie en las bandas 31 y 32 se estimaron a partir de los tipos de cobertura de la Tierra.

Los productos MYD11A1 se proyectan en una *proyección sinusoidal*, representando el producto LST nivel-2 (*MYD11L2*) de *un* km (*0,928 km*).

Los productos LST, incluyendo MYD11A1, se validan para una segunda etapa a través de campañas de campo y estudios de validación basado en la luminosidad (Wan, 2007).

Wan *et al.* (2004), se llevaron campañas de validación de temperaturas en áreas homogéneas en diferentes tipos de cobertura, obteniendo satisfactorios ajustes, con diferencias de menos de un grado para temperaturas entre los *-10 / 50 °C*.

La adquisición de la gama de productos MYD11A1 comenzó el 08 de julio del 2002 y continuará hasta algún tiempo después de que el reprocesamiento de la *versión 6* se haya completado.

4.2 EL SATÉLITE AQUA, SENSOR MODIS

Finalmente, como set de imágenes se utilizaron aquellas imágenes del producto MYD11A1 comprendidas entre los meses de mayo a octubre del año 2011-2015, por ser los meses del año donde se presentan con mayor intensidad los riesgos de ocurrencias de heladas en la provincia de San Felipe de Aconcagua y por tener datos de estaciones meteorológicas para poder validar el modelo.

4.3. Metodología empleada

4.3.1. Antecedentes Generales

La primera etapa consistió en revisar bibliografía para determinar el satélite, el sensor, el tipo de imagen y producto con el cual se podía llevar a cabo la realización y desarrollo del tema.

La elaboración de un Mapa de Ocurrencia de Heladas era parte de los productos que debían realizarse dentro del marco del programa de Bienes Públicos Regionales (BPR), para lo cual, existía la previa idea de utilizar imágenes del satélite Land Satellite (LANDSAT), por su alta disponibilidad de archivos históricos y su resolución espacial de 30 m. El problema, se presentó al momento de revisar las imágenes disponibles para el sector, dado que a partir del año 2013, se encontraron solo disponibles imágenes LANDSAT 7 y LANDSAT 8 con gran cantidad de nubosidad; con anterioridad al año 2013, solo había disponibilidad de imágenes LANDSAT 7 y luego se alterna entre imágenes LANDSAT 5 y LANDSAT 7, lo cual, presenta el mismo problema de nubosidad significativa en el sector, desestimando esta posibilidad debido a que las nubes son un obstáculo importante para la teledetección óptica (Asner, 2001).

Por lo general, los bordes de nubes y las nubes delgadas, son las principales fuentes de contaminación (Platnick *et al.*, 2003).

La siguiente opción consistía en utilizar imágenes del satélite Aqua/MODIS, dado que sus datos poseen una alta sensibilidad radiométrica (*12 bits*), alta calidad geométrica (*error RMS inferior a 50m*), una alta resolución temporal que cubre el territorio de estudio al menos una vez al día; aunque con resoluciones espaciales inferiores a LANDSAT (*250, 500, 1 000 m*), además, estos datos también son distribuidos de manera gratuita (Engel-Cox *et al.*, 2004).

El amplio ángulo de visión del sensor MODIS, permite diferenciar ciertas propiedades de la superficie urbana, estructura geométrica, absorción y reemisión de la radiación (Rasmussen *et al.*, 2010).

Esta exactitud relacionada al ángulo de visualización depende en gran medida de la corrección que se hace a los efectos atmosféricos. Los sesgos anisotrópicos pueden ser detectados debido a la generalización de los parámetros utilizados por los algoritmos de corrección.

En la versión utilizada, MYD11A1 -V5, la mayoría de los píxeles contaminados por nubes y gases derivados de aerosoles fueron eliminados (Wan, 2008).

Un dato importante, es que el sensor MODIS presenta diversas innovaciones en relación a sus precursores debido a que fue diseñado por científicos del área de ciencias de la Tierra, por lo cual fue aumentado el número de bandas espectrales y mejorado el procesamiento de los datos mediante algoritmos específicos que permiten productos de calidad con correcciones atmosféricas, radiométricas y geométricas.

Terminada la revisión bibliográfica e investigadas las situaciones expuestas con anterioridad, se determinó que la mejor opción era trabajar con imágenes del satélite Aqua/MODIS, por lo cual, comenzó la revisión de bibliografía y la construcción del estado del arte para conocer que productos disponibles del satélite Aqua pueden dar solución para la elaboración del mapa en cuestión y qué es lo que está en desarrollo e investigación en el mundo en nuestro presente con respecto a este tipo de temática. Adicionalmente, es fundamental el obtener los datos de las estaciones meteorológicas para validar el modelo que se realizará.

4.3.2. Especificaciones técnicas del modelo

La metodología utilizada corresponde a la descrita por (Pouteau *et al.*, 2011).

La Figura 4.10 resume los procesos que conllevaron a la elaboración del producto.

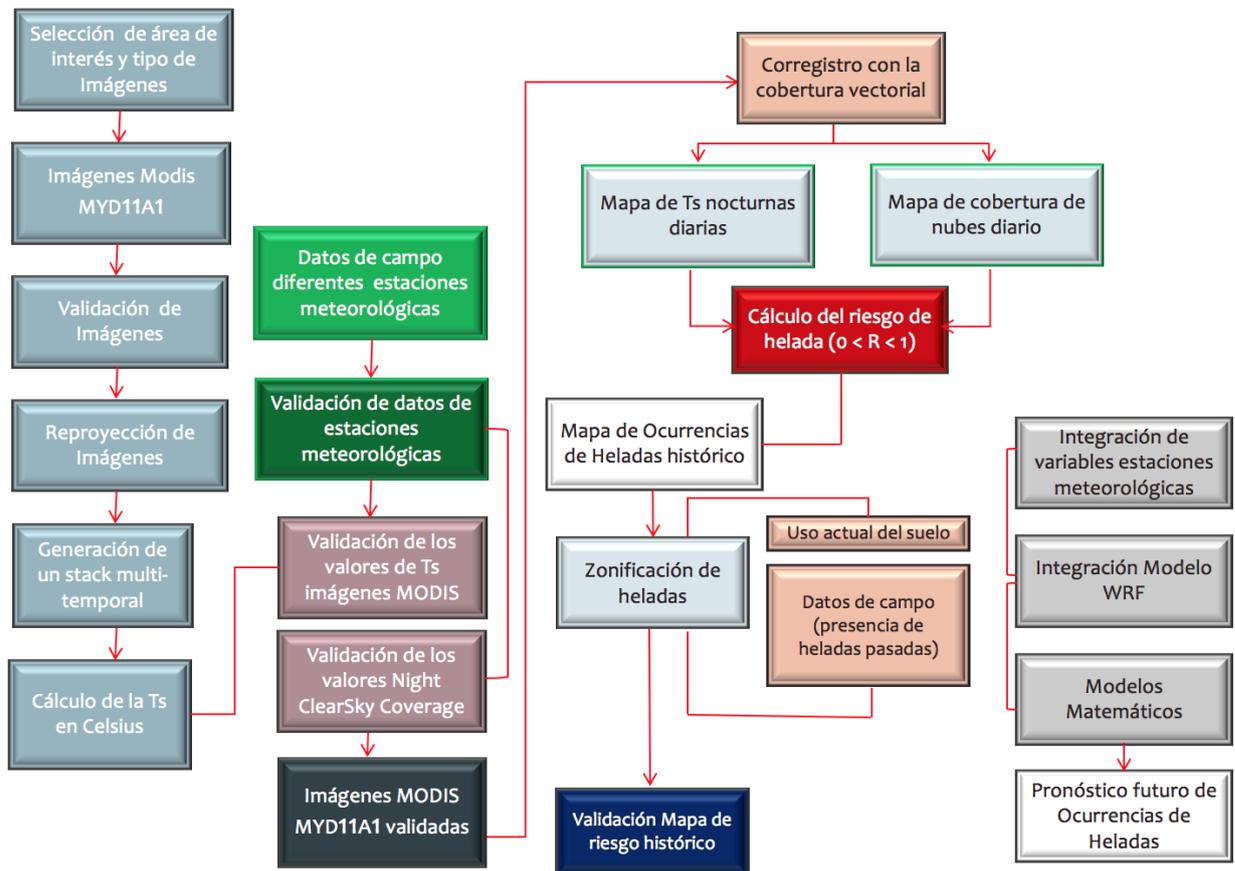


Figura 4.10: Modelo de probabilidad de ocurrencia de helada

Fuente: Winkel, 2010.

De la metodología propuesta, se adaptaron algunos procesos para llevarlos a la realidad de nuestro territorio.

La Figura 4.11 describe cada uno de estos nuevos procesos en los cuales se trabajó.

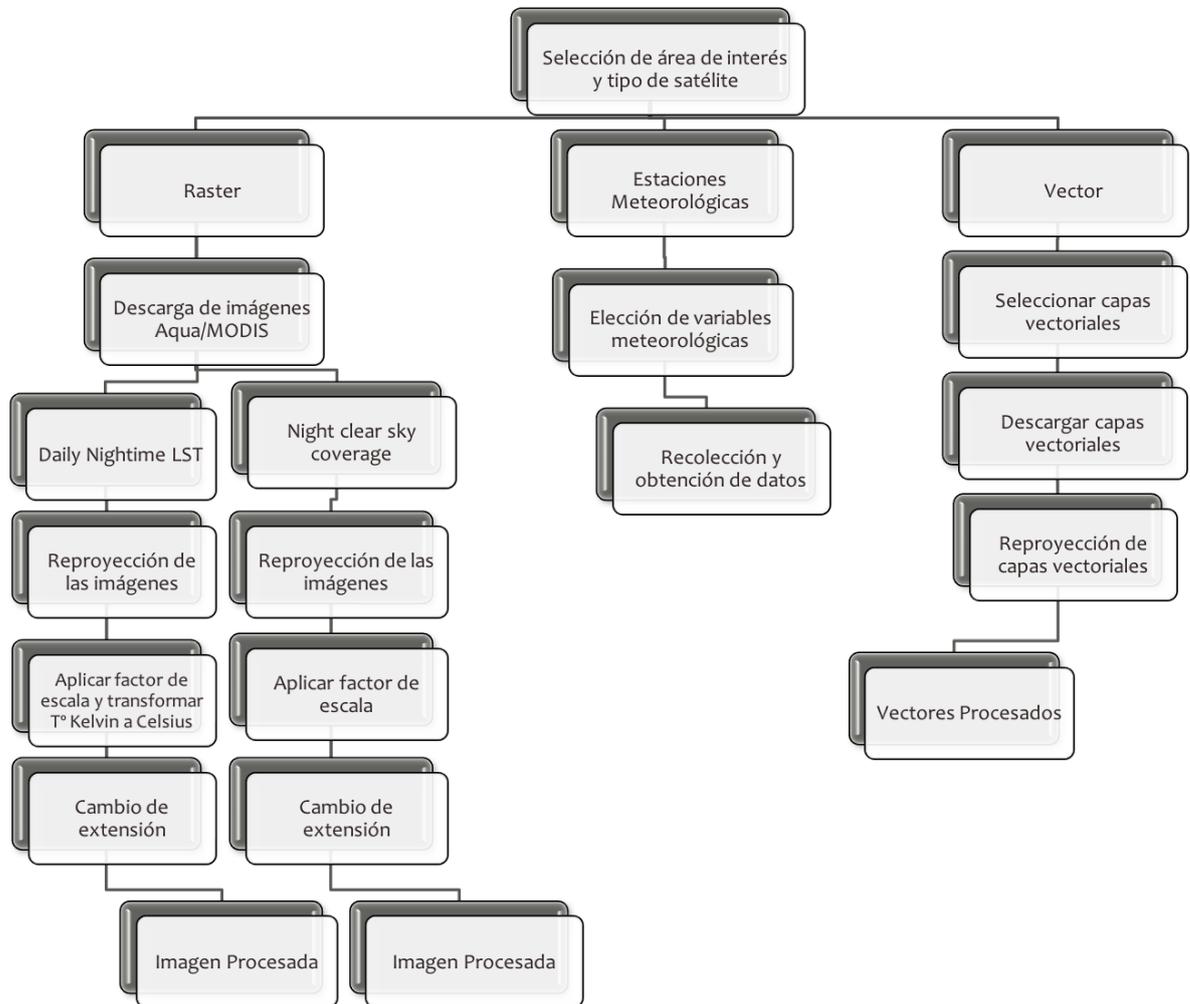


Figura 4.11: Metodología de procesos local

Fuente: Elaboración propia adaptada del modelo de Winkel, 2010.

Como resultado del proceso anterior se elaboraron dos mapas, los cuales corresponde a la temperatura superficial nocturna diaria al primer día de octubre del año 2015, ver Figura 4.12 y al mapa de ocurrencia de helada mensual para el mes de mayo del año 2010, ver Figura 4.13.

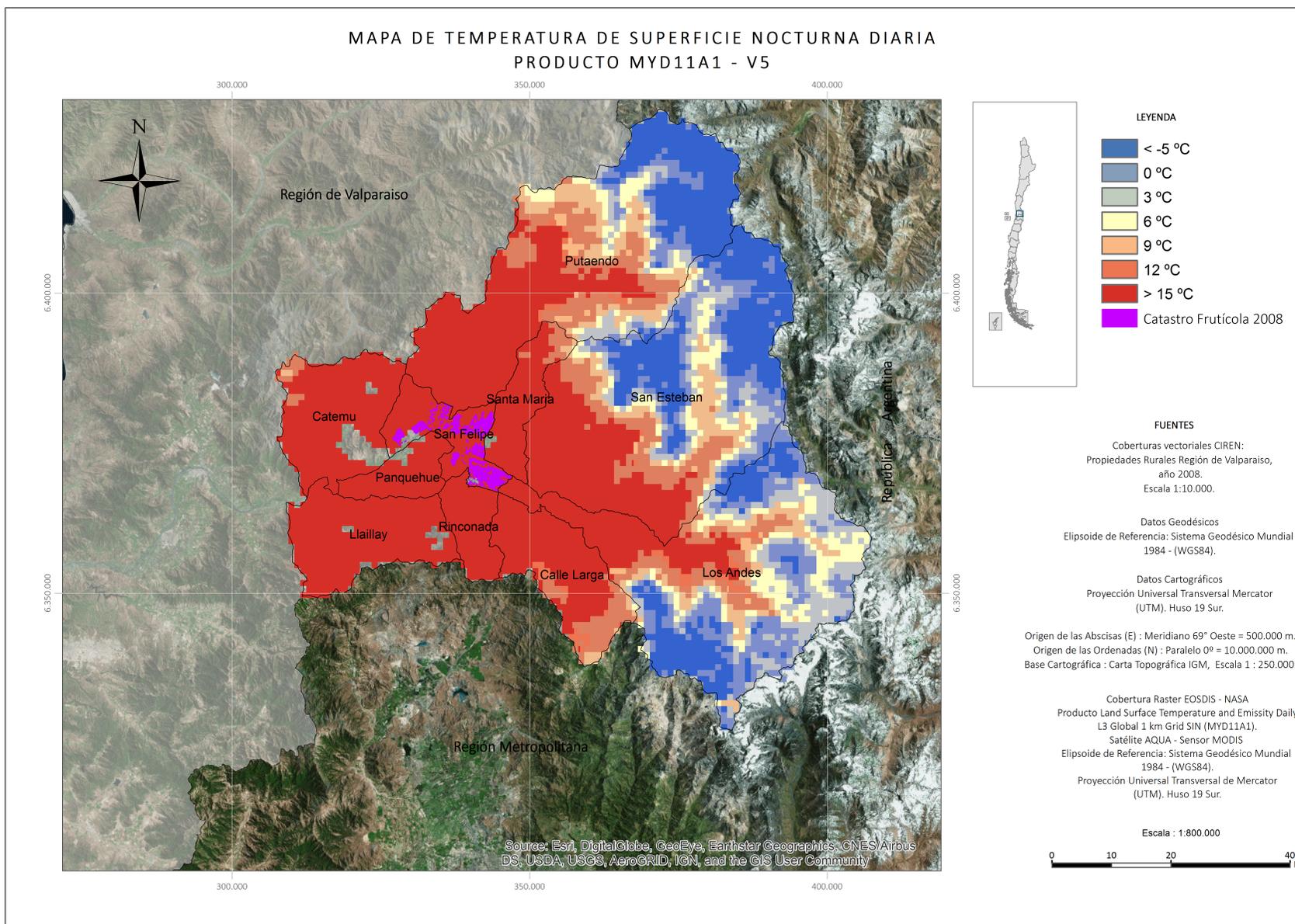


Figura 4.12: Mapa de temperatura superficial, producto MYD11A1 -V5

Fuente: Imagen Aqua/MODIS, producto MYD11A1-V5.

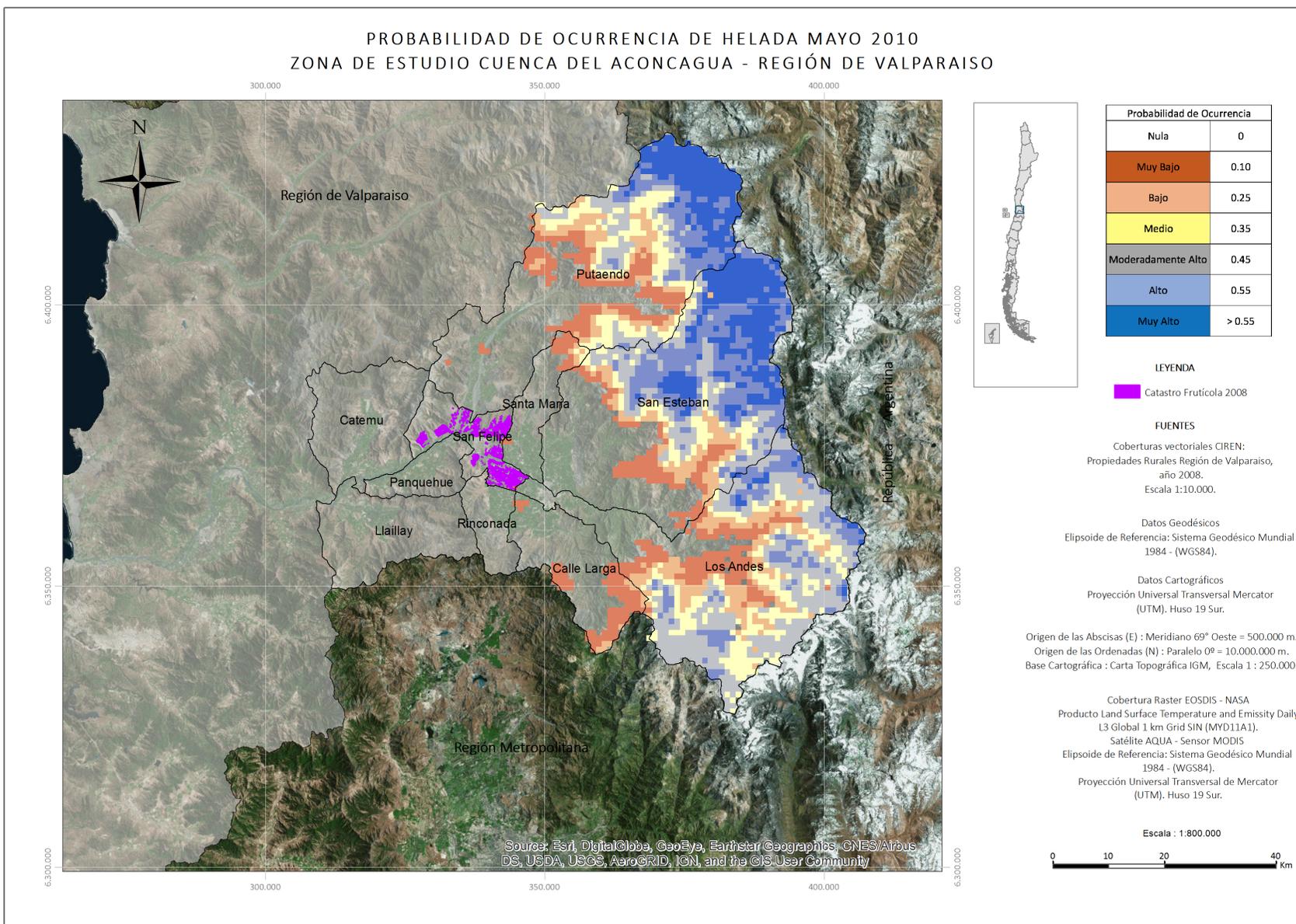


Figura 4.13: Mapa de probabilidad de ocurrencia de helada, mayo 2010
Fuente: Imagen Aqua/MODIS, producto MYD11A1 V5.

La generación de estos mapas de probabilidad de ocurrencia de heladas fueron construidos a partir de los productos *Daily Nighttime 1Km grid Land Surface Temperature* y *Night Clear-Sky coverage*, el cual utilizó el siguiente algoritmo:

$$(\beta_1 \text{ lt } 0 \text{ and } \beta_2 \text{ gt } 0) * 1 \quad (4.2)$$

donde el valor de β_1 corresponde a *Daily Nighttime 1Km grid Land Surface Temperature* y β_2 es *Night Clear-Sky coverage*, el cual describe que si hay presencia de valores de temperatura menores a 0°C y el cielo está despejado, entonces 1.

Finalmente, se efectuó la elaboración de los mapas representativos para cada mes, en los cuales fueron fusionados los datos para el periodo 2010-2016, el que utiliza la siguiente razón:

$$0 \leq R \leq 1 \quad (4.3)$$

donde los valores para R cercanos a 0 *no tienen* probabilidad de ocurrencia de heladas y todos aquellos valores para R cercanos a 1 *tienen* una mayor probabilidad de ocurrencia de heladas.

Las siguientes tablas muestran resultados estadísticos de probabilidad de ocurrencia de heladas, tanto para toda el área por mes (2010-2016), como para cada una de las tres estaciones meteorológicas.

Mes	Mínima	Máxima	Mean	Desviación estándar
mayo	0	0,51	0,10	0,17
junio	0	0,63	0,14	0,19
julio	0	0,70	0,16	0,20
agosto	0	0,58	0,13	0,19
septiembre	0	0,62	0,11	0,19
octubre	0	0,65	0,10	0,19

Tabla 4.2: Resultados estadísticos, mapas de ocurrencia de heladas

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

Mes	Estación Meteorológica		
	La Cruz	Los Andes	Escuela Agrícola
mayo	0	0,01	0,03
junio	0	0,10	0,08
julio	0,01	0,20	0,21
agosto	0,01	0,05	0,06
septiembre	0	0,02	0
octubre	0	0	0

Tabla 4.3: Probabilidad ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

4.3 METODOLOGÍA EMPLEADA

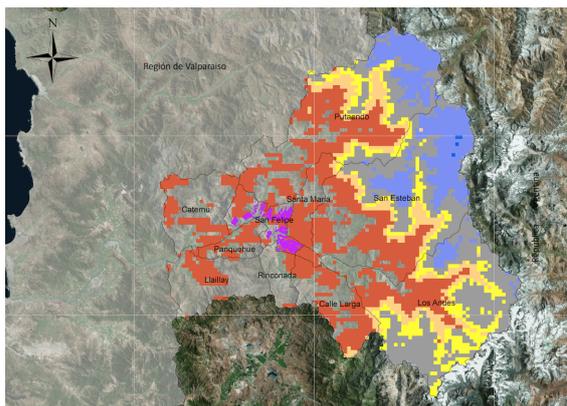


Figura 4.14: Mapa de ocurrencia de heladas mayo (2010-2016)

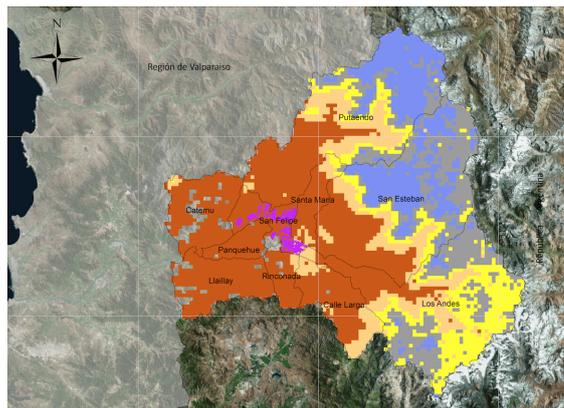


Figura 4.15: Mapa de ocurrencia de heladas junio (2010-2016)

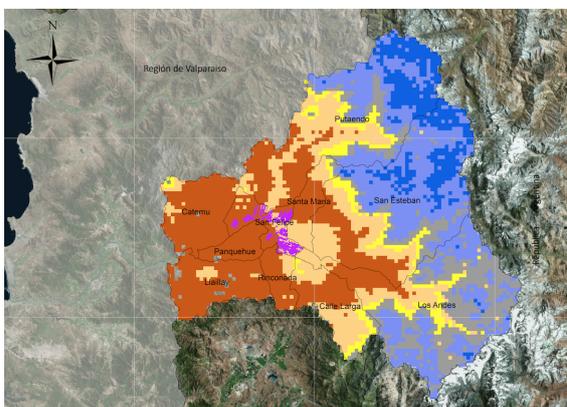


Figura 4.16: Mapa de ocurrencia de heladas julio (2010-2016)

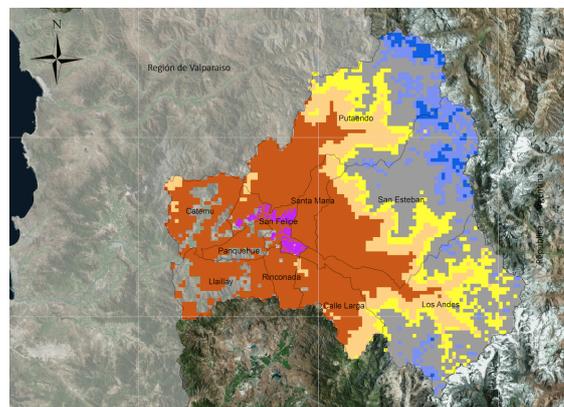


Figura 4.17: Mapa de ocurrencia de heladas agosto (2010-2016)

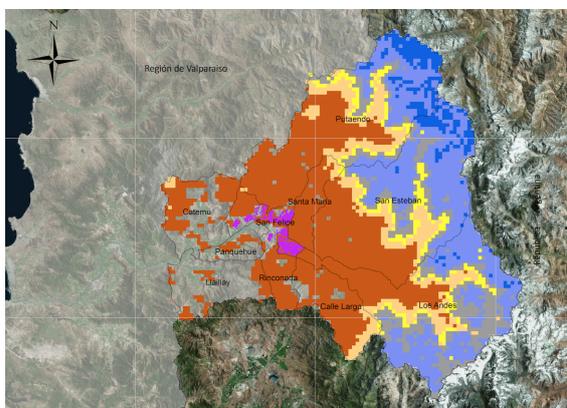


Figura 4.18: Mapa de ocurrencia de heladas septiembre (2010-2016)

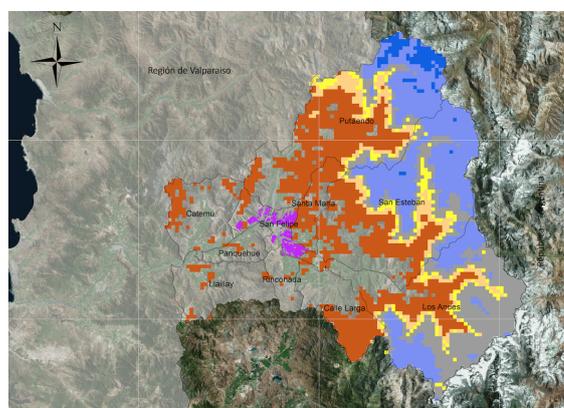


Figura 4.19: Mapa de ocurrencia de heladas octubre (2010-2016)

El siguiente gráfico, identificó las máximas probabilidades de ocurrencias de heladas para el periodo comprendido entre mayo a octubre (2010-2016), donde el mes de *julio* es quién representa el valor de mayor probabilidad, ver Figura 4.20.

Este resultado, tuvo bastante concordancia si se considera que este es el mes donde históricamente se registran en nuestro país las temperaturas más bajas del año (*invierno*) y el mayor número de heladas, ver Figura 4.21.

Cabe destacar, que la información derivada del producto MYD11A1, entrega en los meses de septiembre y octubre (*primavera*) una alta probabilidad de ocurrencia de heladas, lo cual puede ser de suma importancia como dato a considerar, dado que es en este periodo del año donde las plantas, los frutales y las cosechas en general son muy vulnerables a la ocurrencia de heladas y principalmente a las heladas negras, que son las que suelen presentarse en esta época del año. Esta información, debe contrastarse con aquella que proviene de las estaciones meteorológicas, dado que como fenómeno *helada*, en estos meses tiende a cero y existen antecedentes no registrados por las estaciones que *si* se desarrollaron heladas con fuertes pérdidas en el sector agrícola.

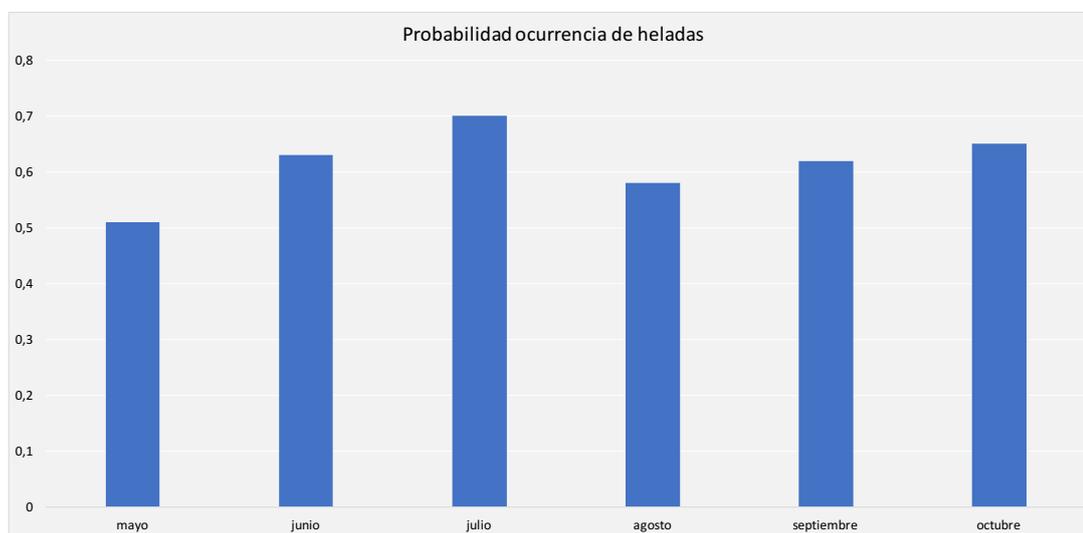


Figura 4.20: Probabilidad ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

Luego, se observó que al considerar la información por estación meteorológica, nuevamente el mes de *julio* es quién presenta la mayor cantidad de ocurrencia de heladas, además, que la estación meteorológica de la comuna de Los Andes junto a la estación de la Escuela agrícola de San Felipe son las que registran la mayor cantidad de heladas, ver Figura 4.22.

Esta información es validada con información histórica de ocurrencias de heladas, dado que se tiene registro de estas para el periodo común entre los años 2004-2014, ver Figura 4.23.

Debido a que *la latitud* es el factor más influyente en la caracterización del tiempo y clima de una región, el hecho de que ambas estaciones meteorológicas se sitúen a mayor altura que la estación meteorológica de la comuna de La Cruz, significa que están expuestas a mayores diferencias de *exposición solar por radiación*, sumado a que la topografía de la zona contiene laderas orientadas en distintas direcciones, con pendientes diferentes, hace que las cantidades de radiación sean muy

4.3 METODOLOGÍA EMPLEADA

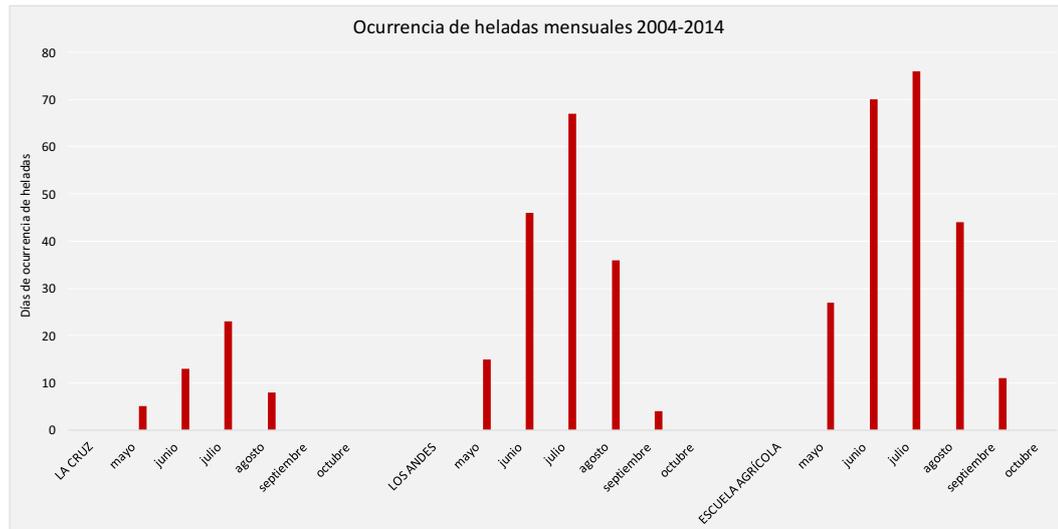


Figura 4.21: Ocurrencia histórica de heladas mensuales, periodo 2004-2014

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

diferentes y que aquellas zonas expuestas a *barlovento* tengan una mayor proliferación a desarrollar heladas por la escasa circulación de los vientos.

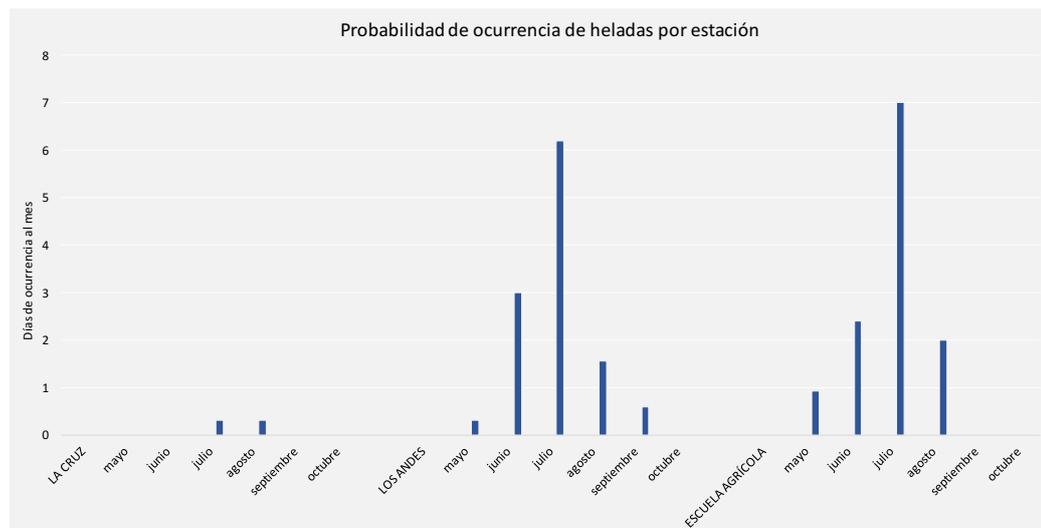


Figura 4.22: Ocurrencia de heladas mensual, periodo 2010-2016

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

Al observar la Figura 4.23, existe un aumento de las heladas declaradas en todas las estaciones entre los años 2007, 2011 y 2012. Esto, se debió principalmente a que son años en los cuales estuvo presente el fenómeno de *La Niña*, la cual enfría el nivel del agua en la costa, lo que intensifica la corriente de Humboldt, que es una corriente fría, por lo cual el agua superficial del mar será aún más fría. Este detalle significará que se intensifican las altas presiones, hay menos formación de nubes, aumentan las noches despejadas, disminuye la presencia de precipitaciones, por lo cual, existe mayor *ocurrencia de heladas*.

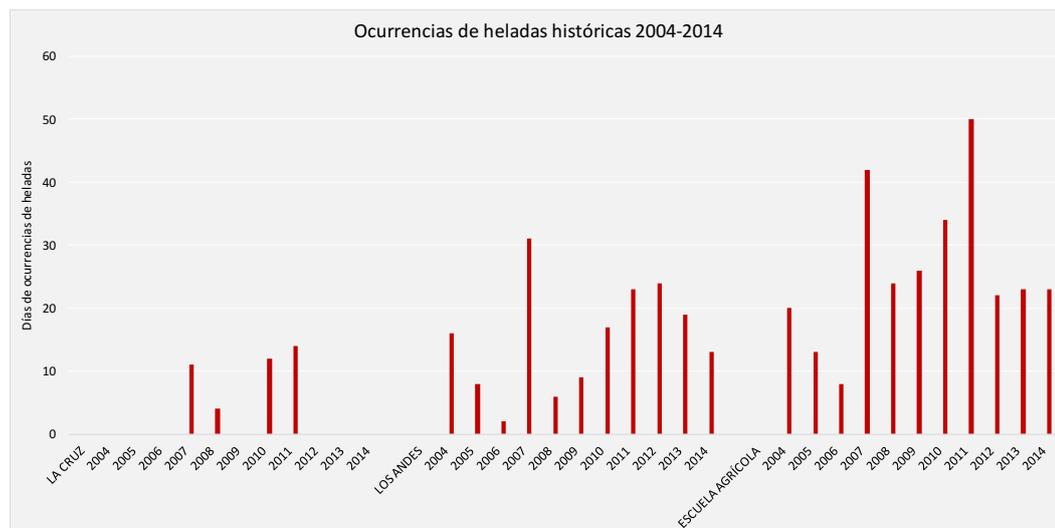


Figura 4.23: Ocurrencia de heladas anual, periodo 2010-2016

Fuente: Datos estaciones meteorológicas.

4.3.3. Conclusiones del Capítulo

El fenómeno meteorológico de las heladas, dependiendo del sector que se vaya a estudiar tiene distintos factores por los cuales se puede desarrollar o presentar. Para el caso de Chile y en especial para el sector en estudio, son las heladas invernales y radiativas las que predominan en los valles y laderas. Estas ocurren principalmente durante el invierno y son producidas por pérdidas de calor radiativo, en noches frías, sin viento, baja temperatura y un alto nivel de humedad. A pesar que estas son numerosas en determinados lugares, en esta época los daños son menores ya que las plantas en general están en su reposo vegetativo, por lo cual, pueden soportar de mejor manera las bajas temperaturas.

Sin embargo, es preocupante el ver que se presentan para meses posteriores al invierno, heladas del tipo *advectivas*, las cuales obedecen a patrones de desplazamientos de masas de aire muy heladas y seco que cubren extensas zonas incluso por días. Estas son asociadas al tipo de helada negra, la cual produce en muchas ocasiones la muerte del cultivo dado a que este frío seco actúa directamente sobre la estructura molecular de la planta, destruyendo su tejido interno.

En nuestro país, fueron conocidas aquellas heladas tardías que fueron registradas durante el mes de septiembre del año 2013 y 2015. Esta última, afectó a una gran parte del valle central del país, específicamente al cultivo de la vid, el cual en cifras de producción recortó la cifra anual en un 21 %, repercutiendo en la producción de vinos de exportación desde la región de Valparaíso a la región del Maule y por consiguiente, una fuerte pérdida en los ingresos de cientos de productores a nivel nacional.

5.1. Validación de imágenes MODIS

La percepción remota ha sido considerada una tecnología ideal en el monitoreo y mapeo de las cubiertas terrestres debido a su capacidad de proporcionar observaciones sinópticas y repetitivas (Franklin y Wulder, 2002).

Las lecciones aprendidas en las anteriores generaciones de sistemas mundiales de imágenes de la Tierra indican que la validación es *crítica* para un uso preciso y confiable de los productos (Cihlar *et al.*, 1997).

El Grupo de trabajo del comité de satélites de la Tierra sobre Calibración y Validación (WGCV), define la *validación* como el proceso de evaluar por medios independientes la calidad de los productos de datos derivados de los productos del sistema.

En este contexto, las actividades de validación corresponderán al Equipo científico de MODIS (MODLAND), quienes recopilarán y utilizarán datos independientes de campo, aerotransportados y otros satélites para evaluar la calidad de los productos y así proporcionar a la comunidad de usuarios estimaciones cuantitativas de la incertidumbre de los productos MODIS (Justice *et al.*, 2000).

Para lo anterior, se definieron *sitios*, los que comprenden un área que es nominalmente un círculo de 100 km de radio. Sin embargo, el área útil depende de cada aplicación (Morissette *et al.*, 2002).

El proceso de validación se realizó siguiendo las etapas definidas por (Nightingale *et al.*, 2008)

1. La fiabilidad del producto se estimó al utilizar medidas independientes obtenidas de un pequeño número de sitios y periodos de tiempo.
2. La evaluación se hizo con base en un amplio grupo de sitios y fechas, además, de contar con un gran número de datos de campo.

5.1 VALIDACIÓN DE IMÁGENES MODIS

3. La fiabilidad se obtuvo a través de medidas independientes hechas de manera sistemática y estadísticamente robusta que representara las condiciones globales. Por lo tanto, existen estimadores de *incertidumbre* de estos productos, lo cual considera que aún pueden generarse versiones mejoradas.
4. Los resultados de una validación serán liberados cuando sea lanzada una nueva versión.

Por consiguiente, todos los productos archivados son reprocesados, incluyendo aquellos productos de fechas anteriores, por lo cual, las colecciones más recientes brindarán un mejor desempeño.

Además, los datos generados y obtenidos a través de MODIS ofrecen diferentes dimensiones de la información del sensor:

- a) Espectral, en donde la información *espectral* es una estimación de la reflectancia de la superficie. Esta información incluye imágenes diarias y los compuestos de varias fechas.
- b) Temporal, la alta resolución temporal de MODIS permite el análisis a través del tiempo.
- c) Angular, debido al amplio campo de visión que proporcionan los sensores MODIS, es posible tener registros del mismo píxel muestreado en diferentes geometrías objeto-sensor-sol. Debido a que la distribución de la reflectancia de muchas cubiertas del suelo es fuertemente anisotrópica, la observación multiangular contiene información adicional a la adquirida únicamente en el nadir o en un solo ángulo. Una dimensión adicional incluida en los datos MODIS es la capa presentada en forma de índices que expresan las condiciones atmosféricas, índice general de calidad (índice de utilidad) o geometría de la visión (Asner *et al.*, 1998).

Algunos *sitios* de validación se muestran a continuación, ver Figura 5.1.



Figura 5.1: Distribución de sitios de validación EOS en el mundo

Fuente: <http://landval.gsfc.nasa.gov/images/>

5.2. Validación de datos meteorológicos

La información meteorológica es una de las herramientas más importantes para la toma de decisiones en la agricultura (Weiss y Robb, 1986).

Durante las últimas décadas se ha producido una gran expansión de las redes de estaciones meteorológicas automáticas en todo el mundo. Para el caso de Chile, esto no es diferente, dado que hoy existen instituciones que a través de alianzas trabajan en consolidar nuevas estaciones meteorológicas y construir bases de datos más exactas y representativas, dentro de las que destaca la Red Agroclimática Nacional (AGROMET), quienes han integrado más de 100 nuevas estaciones meteorológicas a lo largo del país.

Esta rápida evolución es consecuencia de la necesidad de disponer de datos meteorológicos específicos en tiempo real o casi real (Miller y Barth, 2003), así como de la evolución de los sistemas automáticos de adquisición de datos. Sin embargo, los servicios meteorológicos nacionales no disponen de redes que permitan realizar tales funciones, las que suministran en muchos casos, únicamente registros de temperatura del aire y precipitación (Gázquez *et al.*, 2003).

La información meteorológica es recogida en potentes bases de datos. No obstante, las metodologías aplicadas en su control de calidad son variadas y los procesos para asegurar la calidad de los registros son con frecuencia dudosos, siendo en algunos casos inexistentes (Meek y Hatfield, 1994).

Se puede afirmar que existen tres razones por las cuales es necesario aplicar un sistema de control de calidad:

1. Asegura que la información está siendo generada adecuadamente.
2. Identifica, y en su caso corrige los registros erróneos que conducirían a una inadecuada toma de decisiones.
3. Permite detectar problemas para resolverlos mediante las oportunas labores de mantenimiento, reparación y calibración de los sensores (Doraiswamy *et al.*, 2000).

Con la finalidad de asegurar la calidad de los datos obtenidos, se pueden aplicar diferentes métodos que van desde aquellos que implican el mantenimiento regular de las estaciones meteorológicas y la verificación en campo de la información proporcionada por los sensores, hasta los basados en la validación de los datos registrados, las cuales utilizan procedimientos estadísticos.

Un tipo de metodología o *prueba de validación* es el que se utiliza bajo la norma UNE 500540 (2004), el cual define *siete niveles* de validación que deben aplicarse sucesivamente, con excepción de la inspección visual (*nivel seis*), que puede hacerse una vez realizada la validación correspondiente a los niveles *cero* y *uno*.

Estos últimos niveles son de obligada aplicación, mientras que el resto son opcionales.

Únicamente se califican de forma automática como *no válidos*, aquellos datos que no superen el nivel *cero* o la prueba de *límites rígidos* (*nivel uno*).

Los datos que no pasan con éxito cualquiera de las otras pruebas se consideran *sospechosos* y se deberá discernir si el dato es *válido* o no por inspección visual.

La prueba de validación de datos meteorológicos está estructurada de la siguiente manera:

Nivel cero

Validación de la estructura del registro de datos

Se evidencia que tanto la estructura del registro como el número de datos son los que se espera que lleguen. Si alguno de los datos no puede ser extraído correctamente, se considerará dicho dato como no válido. Si existe error en el dato correspondiente a la fecha o a la hora, todos los datos del registro asociados a esa fecha y hora se considerarán *no válidos*.

Nivel uno

Validación de los datos según límites

Se comprueba el rango de los valores meteorológicos introducidos en la base de datos. Por *rango*, se entiende como el límite superior y el inferior entre los que debe estar el valor de un dato para ser considerado como válido (Feng *et al.*, 2004).

En consecuencia, se definieron dos tipos de límites:

1. *Límites rígidos - físicos e instrumentales*

Se aplicarán los límites que resulten más restrictivos de los físicos e instrumentales. Cualquier dato *fuera* de los límites establecidos será un dato *no válido*.

La Tabla 5.1 indica los límites físicos aplicables según la norma UNE 500540 (2004).

Variable	Unidad	Rango
Temperatura del aire	°C	-33 / 55
Humedad relativa del aire	%	0 / 100
Velocidad del viento	m/s	0 / 75
Dirección del viento	grados	0 / 360
Presión	hPa	700 / 1080
Radiación solar global	Wm ⁻²	-1 / 1400
Precipitación en 10 min	Mn	0 / 50

Tabla 5.1: Límites físicos de diferentes variables meteorológicas

Fuente: UNE 500540, 2004.

2. *Límites flexibles - efemérides meteorológicas*

Estos límites se basarán en los valores extremos que las distintas variables puedan adquirir en la zona donde está ubicada la estación (UNE 500510, 2005). Idealmente es contar con un conjunto de efemérides meteorológicas para cada mes, que sean representativas del entorno de donde provienen los datos que se validan. Si el dato no supera esta prueba de límites flexibles, será calificado como sospechoso y se deberá hacer una inspección visual para considerarlo válido o no. Estas pruebas incorporan un módulo de verificación de efemérides en el que cada valor se comparará con el valor extremo registrado históricamente en la misma estación. Si el registro que se está validando supera el valor extremo prefijado, el sistema generará una alerta que deberá ser validada por el administrador para incorporarla como nuevas efemérides.

Nivel dos

Validación de la coherencia temporal del dato

Los procedimientos basados en la coherencia temporal comprueban si la diferencia entre medidas meteorológicas sucesivas excede un valor determinado, en dicho caso habría que sospechar de ambas medidas (Graybeal *et al.*, 2004).

Es decir, se verifica el exceso de variabilidad de dos registros consecutivos. Si esta diferencia supera el valor preestablecido dentro del sistema de validación, se genera una alerta para los dos datos, lo cual compara el cambio entre dos o más observaciones consecutivas separadas media hora unas de otras. Si la diferencia excede un valor prefijado, distinto para cada variable, se considerará que el dato o datos no ha superado la prueba.

Nivel tres

Validación de la coherencia interna de los datos, relación entre variables

Los procedimientos denominados de coherencia interna están basados en la verificación de la coherencia física o climatológica de cada variable observada o también de la consistencia entre variables (Grüter *et al.*, 2001).

Los valores medidos al mismo tiempo y en el mismo lugar no pueden ser incoherentes entre ellos. En este caso, puesto que no se puede discernir cuál de las variables involucradas es la responsable, se considerará que ambas observaciones no superaron este análisis.

Nivel cuatro

Validación de la coherencia temporal de la serie

Este nivel de validación se aplicará sobre series temporales de datos del periodo que se vaya a analizar (*p.e. cada 24 horas*). Se calculará la media y la desviación típica de cada variable. Si la desviación típica fuese menor que un mínimo aceptable, todos los datos de ese periodo se considerarán sospechosos (Shafer *et al.*, 2000).

Nivel cinco

Validación de la coherencia espacial. Contraste de los datos de cada estación con datos de otras estaciones

Se tiene en cuenta que los valores de una misma variable medidos al mismo tiempo en estaciones correlacionadas no pueden diferir demasiado unos de otros (Hubbard y Siva Kumar, 2001).

El llevar a la práctica esta prueba, puede resultar más o menos complicado dependiendo de la densidad de estaciones y de lo compleja que sea la orografía de la zona. Para llevar a cabo esta prueba se aplicarán (*p.e. técnicas de interpolación*). Es suficiente con aplicar algún método sencillo que permitan detectar los errores más groseros. Los errores más sutiles se pueden descubrir por inspección visual. Para validar la coherencia espacial se suele estimar un valor para cada observación.

Esto se hace a partir de datos de la misma variable (*que no hayan sido etiquetados como no válidos en niveles previos*), registrados en otras estaciones correlacionadas con la variable que se está analizando.

Nivel seis

Validación por inspección visual

Para llevar a cabo una inspección visual sobre los datos que se pretende analizar, resulta muy útil representar la evolución temporal de las distintas variables, especialmente cuando se trate de determinar si un dato sospechoso es válido o no válido. Resulta útil cartografiar valores máximos, mínimos y acumulados de las distintas variables, así como de parámetros derivados. Para identificar problemas sutiles, en el caso de la temperatura, la velocidad, la dirección del viento y la presión, se recomienda un análisis de valores promedio a una hora específica del día. En el caso de la humedad relativa, utilizar la media de los máximos y la media de los mínimos.

En el caso de los *datos meteorológicos* utilizados en los siguientes capítulos, se señala que se aplicaron los niveles de validación descritos anteriormente.

5.3. Validación de datos MYD11A1-V5

Una vez concluida la etapa de elaboración de los mapas mensuales históricos de ocurrencias de heladas (*periodo mayo a octubre 2010-2016*), se procedió a comparar las temperaturas de superficie (*temperatura de brillo*) LST entregadas por el sensor del satélite Aqua/MODIS con los datos de Temperatura del Aire (TA) de tres estaciones meteorológicas, con la finalidad de observar algún grado de correlación entre ambos datos de temperatura y generar un modelo que permita estimar la TA mediante LST.

El proceso de cálculo de temperatura se inicia con el ND detectados por el sensor, valores que codifican un valor de radiancia correspondiente al infrarrojo térmico. El objetivo es encontrar la relación entre el flujo emitido por el suelo y el recibido por el sensor, magnitudes entre las que se interponen los componentes de la atmósfera, que también emiten su propia energía, lo que distorsiona la radiancia recibida por el sensor.

La metodología, por ende, consistió en comparar el valor del píxel transformado en temperatura °C con el valor de la TA de la estación meteorológica situada en la zona del píxel, con lo cual, se estaría haciendo una comparación a escala local según la OMM. Algunos estudios anteriores, avalaron que la precisión del producto MODIS LST es aproximadamente 1 °C en el intervalo entre los -10 / 50 °C con cielos despejados y aún mejor a las primeras horas de la madrugada (Rigo *et al.*, 2006).

Estos registros de temperatura utilizados corresponden a las estaciones meteorológicas de la Escuela agrícola de San Felipe, a la comuna de Los Andes y a la comuna de La Cruz para el mes de mayo del año 2011, ver Figura 5.2.

LST, derivado de satélites se definió como la temperatura de *radiación* de la superficie observada por los sensores de los satélites. La superficie terrestre se definió como la parte superior del follaje en áreas vegetadas o la superficie del suelo en zonas sin vegetación (Jones *et al.*, 2004).

Adicionalmente, LST sólo puede ser estimado en condiciones de cielo despejado de nubes a través del *infrarrojo*, debido a que la mayoría de los canales del infrarrojo se ven afectados al pasar por las nubes que absorben la energía de estos canales (Wan, 2008).

Por lo anterior, la ausencia de información para algunos días del mes se debió principalmente a la *presencia de nubes* en el área de estudio.

Para este análisis, se efectuó una *regresión lineal simple*, la cual considera solo una variable *independiente* y otra *dependiente*. La relación entre variables supone encontrar una línea media que resuma o sintetice la dependencia entre *Y* e *X*, con la finalidad de explicación o descripción causal de la variable dependiente y previsión de los valores futuros de *Y* para los valores dados de *X*.



Figura 5.2: Ubicación espacial de las tres estaciones meteorológicas
Fuente: Imagen, gentileza de Google Earth.

5.3.1. Análisis de variables mediante regresión lineal simple

Las siguientes coordenadas están referidas al Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC), denominado Universal Transversal de Mercator (UTM), las cuales corresponden a la ubicación espacial de la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, ver Tabla 5.2.

Estación Meteorológica	
Norte	6 374 843 metros
Este	339 256 metros
Altura	672 metros

Tabla 5.2: Ubicación de la estación meteorológica, sistema de coordenadas UTM - Datum WGS 84 Huso 19 sur

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Los datos de la Tabla 5.3 pertenecen a aquellas temperaturas superficiales registradas por el sensor del satélite Aqua/MODIS y a las temperaturas del aire a 1,5 m registradas en la casilla de la estación meteorológica a la hora de la circulación del satélite por el lugar (02:00 a 04:00 de la madrugada aproximadamente) hora local de Chile, ver Figura 5.3.

Día	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	28	29	30	31
T °C Superficie	7,0	8,1	6,9	8,1	9,6	6,8	5,6	5,6	5,0	9,3	7,7	7,3	5,8	5,0	5,1	4,5	5,6	5,3	2,4	5,2	4,4	4,2
T °C del Aire	2,6	3,1	2,9	2,6	5,5	1,8	1,7	-0,1	1,9	6,6	3,5	3,0	1,9	1,5	2,4	0,3	1,8	0,5	1,7	1,7	0,4	0,1

Tabla 5.3: Temperaturas registradas en la estación meteorológica correspondientes a mayo del 2011

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

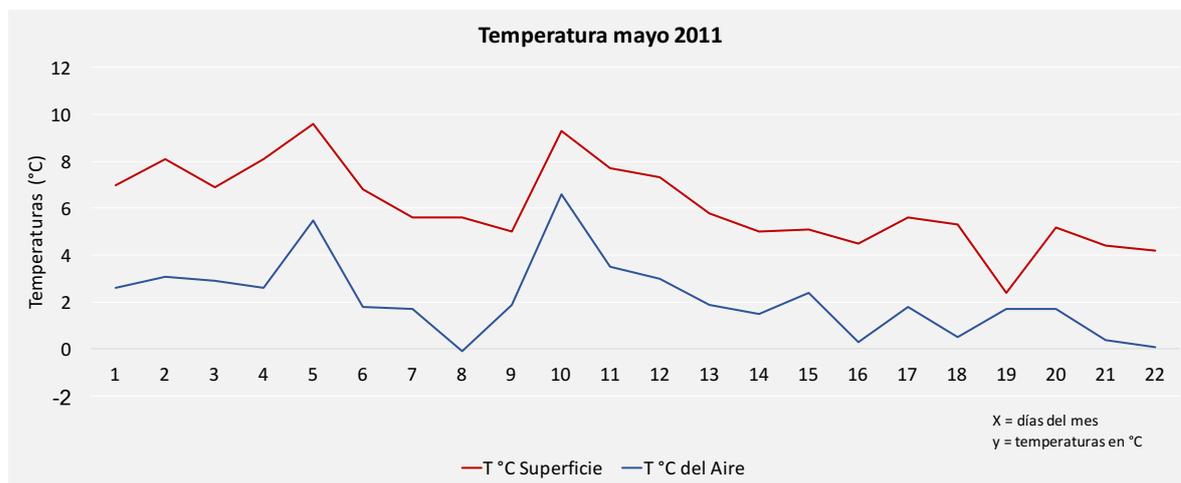


Figura 5.3: Distribución diaria de temperaturas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Una vez tabulados los datos de temperatura, se procedió a llevar a cabo una inspección gráfica de los datos mediante un *diagrama de dispersión* para conocer su distribución, relación e identificar algún tipo de comportamiento. Luego, se los ajustó mediante una *regresión lineal simple*, ver Figura 5.4.

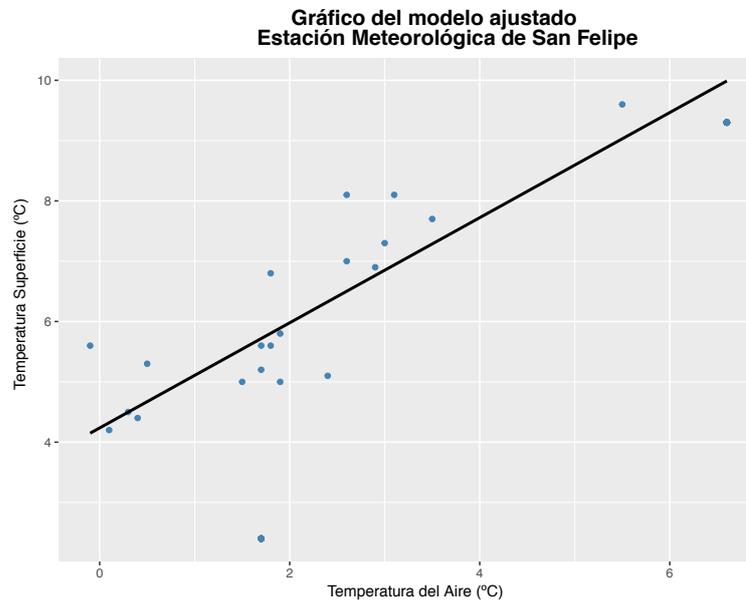


Figura 5.4: Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La *ecuación de la recta de ajuste* para el modelo lineal, describirá la relación entre las variables Y (*temperatura superficie*) y X (*temperatura del aire*) de la siguiente manera:

$$Y_i = mX_i + n \quad (5.1)$$

$$X_i = (Y_i - n)/m \quad (5.2)$$

donde m y n son las constantes del ajuste.

Se denominará al coeficiente m con el nombre de **pendiente de la recta**, el cual mide el cambio en Y por cada unidad de cambio en X y el coeficiente n como la **ordenada al origen**, que es el punto donde la recta interseca con el eje Y , es decir el valor de Y cuando $X = 0$.

Esta ecuación se puede utilizar para *predecir* los valores de Y para determinados valores de X .

Al evaluar en algún valor X_i (*valor de la temperatura del aire medido*) se obtendrá un valor Y_{pi} (*valor de temperatura superficial predicha por el modelo*).

Abuín (2007), determinó el grado de R^2 categorizándolo dentro del siguiente rango, ver Tabla 5.4.

<i>Menor de 0,3</i>	<i>0,3 a 0,4</i>	<i>0,4 a 0,5</i>	<i>0,5 a 0,85</i>	<i>Mayor de 0,85</i>
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Tabla 5.4: Categorización para los valores de R^2

Fuente: Abuin, 2007.

Para evaluar las *bondades* del modelo propuesto, se consideraron los diversos indicadores estadísticos, ver Tabla 5.5 y Tabla 5.6.

<i>Estadísticas de la regresión</i>		<i>Correlación de Pearson</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,81	t	6,07
Coefficiente de correlación R^2	0,65	df	20
R^2 ajustado	0,63	p-valor	6,2e - 06
Error estandar del estadístico	1,07	Intervalo de confianza 95 %	0,6 - 0,9
Error absoluto medio	0,72	Correlación estimada	0,81
Durbin Watson	1,8 (p = 0,3)		
Observaciones	22		

Tabla 5.5: Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El *coeficiente de determinación* en el modelo de regresión lineal simple coincide con el *coeficiente de correlación al cuadrado*. Este *coeficiente* es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad *predictiva* del modelo ajustado (Bande et al., 2008).

El valor obtenido tras el ajuste de los datos para el estadístico R^2 es 0,65; lo que indicó que el modelo de regresión lineal es *bueno* (Abuín, 2007).

El *coeficiente de correlación múltiple* es utilizado en caso de considerar más de una variable explicativa. Al utilizar solo una variable, su valor coincide con el valor del coeficiente de correlación y su *cuadrado* con el coeficiente de determinación. Para este caso, se obtuvo un valor de 0,81; el cual indica una *bueno y positiva* correlación entre las variables, por lo cual se puede considerar que cuando X aumenta, el valor de Y también tiende a aumentar.

El *error estándar del estimado* es la desviación estándar de los residuos. Este parámetro puede usarse para construir límites de predicción para nuevas observaciones. En este análisis se obtuvo el valor 1,07.

La *correlación de Pearson* obtuvo un valor igual a 0,81 lo cual indica que las variables están correlacionadas linealmente.

Una vez, realizada la estimación puntual del coeficiente de correlación, para asegurar la existencia de relación entre la variable dependiente y predictora, se efectuó una prueba para estudiar la significación estadística. Para esto, se enfrentó la hipótesis nula ($H_0 : r = 0$, no relación) frente a la hipótesis alternativa ($H_1 : r \neq 0$ existe relación).

Dado que el p -valor $< 0,05$ rechazo la hipótesis nula (H_0), por lo cual, acepto la hipótesis alternativa (H_1), que indicó que *si* existe relación estadística significativa entre las variables (*temperatura de superficie y temperatura del aire*).

El estadístico de *Durbin-Watson* examinó los residuos para determinar *si hay* alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan en el archivo los datos. Debido a que para este caso el p -valor $> 0,05$; no hay indicación de una *autocorrelación* serial de los residuos con un nivel de confianza del 95 %, existiendo entonces una *independencia* de los residuos.

Coeficientes				
	Coeficientes	Error de ajuste	IC de 95 %	IP de 95 %
Intercepto	4,2 °C	0,4	3,4 - 5,0	1,9 - 6,6
Pendiente	0,9 °C	0,1	0,6 - 1,2	

Anova					
	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor P
Regresión	1	42,1	42,1	36,9	0,0
Residuos	20	22,8	1,1		
Total	21	64,9			

Tabla 5.6: Valores obtenidos tras la realización de distintas pruebas estadísticas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Obtenidos los *coeficientes*, la ecuación correspondiente a la *regresión lineal ajustada* quedó construida de la siguiente manera;

$$Y = 4,2 + 0,9X \quad (5.3)$$

Se concluyó que la temperatura registrada por el sensor MODIS en superficie es igual a 4,2 °C, por lo cual, la temperatura del aire tendrá un valor *aproximado a 0 °C*.

Puesto que el p -valor $< 0,05$; existe una relación estadísticamente significativa entre Y e X con un nivel de confianza del 95 %.

La aplicación de otras pruebas estadísticas, permitieron conocer si existe presencia de puntos *atípicos*; esto es, valores extraños o extremos que están alejados de los valores centrales de la muestra, por lo que su presencia es dudosa y son candidatos para ser excluidos de los análisis estadísticos (Díaz, 2009).

La tabla de *residuos atípicos*, identifica observaciones que tienen residuos *estudentizados* mayores a $|2|$. Los residuos *estudentizados*, miden cuántas desviaciones estándar se desvía cada valor observado de y del modelo ajustado, el cual utilizó todos los datos, excepto esa observación. Dado que el valor del residual es *mayor a tres*, es conveniente examinar detenidamente la observación, ver Tabla 5.7.

La tabla de *puntos influyentes*, muestra todas las observaciones que tienen valores de influencia mayores que *tres* veces la de un punto promedio de los datos. El *valor de influencia*, es un estadístico que mide que tan *influyente* es cada observación en la determinación de los coeficientes del modelo estimado.

Para esta base de datos, el punto promedio de los datos tiene un valor de influencia igual a 0,09. Si bien, el punto de *día N°12* tiene un valor de influencia *tres* veces mayor a la *influencia media*, al ser

Residuos Atípicos						
Día	x	y	Predicción y	Residuos	Residuos Studentizados	
28	1,7	2,4	5,7	-3,4	-4,5	

Tabla 5.7: Valor puesto en observación aplicada la prueba de Residuos Atípicos
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

un valor pequeño *no* altera *ni* influye en el modelo como lo hace el punto del *día N°28*, por lo cual, *no* será puesto bajo observación, ver Tabla 5.8.

Puntos Influyentes						
Día	x	y	Predicción y	Residuos Studentizados	Influencia	
12	6,6	9,3	10,0	-0,9	-0,4	

Tabla 5.8: Puntos Influyentes, estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El resultado del siguiente gráfico identificó la *presencia* de *dos* puntos que pueden ser *atípicos*, ya que difieren en su *distribución* con respecto al resto del universo de los puntos y podrían estar influenciando el modelo lineal de una forma no deseada, aunque la prueba anterior sólo resaltó mayormente la observación en el punto del *día N°19* ($x=1.7; y=2.4$), ver Figura 5.5.

Al realizar el *histograma* junto a la *curva de normalidad*, se observó que los residuos estandarizados siguen una distribución normal, ver Figura 5.6.

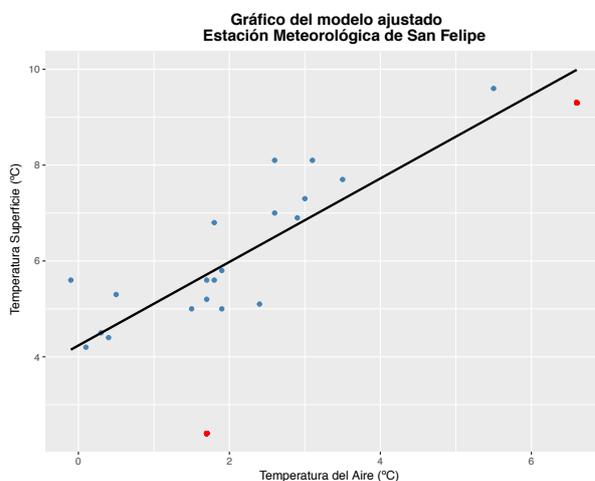


Figura 5.5: Identificación de Valores Atípicos
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

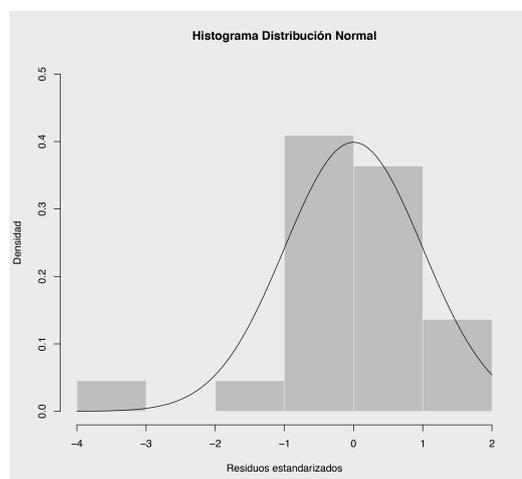


Figura 5.6: Distribución de Residuos Estandarizados
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Además, fueron realizados los gráficos QQ-Plot, para la temperaturaa de superficie y la temperatura del aire, los cuales reflejaron una cierta normalidad de los datos, ver Figura 5.7 y Figura 5.8.

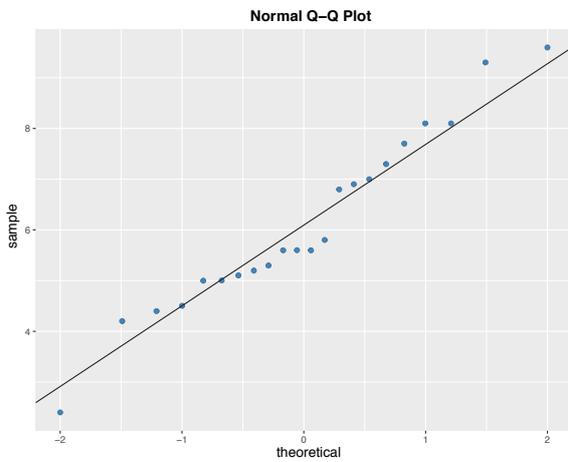


Figura 5.7: Cuantil normal estándar aplicado a la Temperatura de Superficie
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

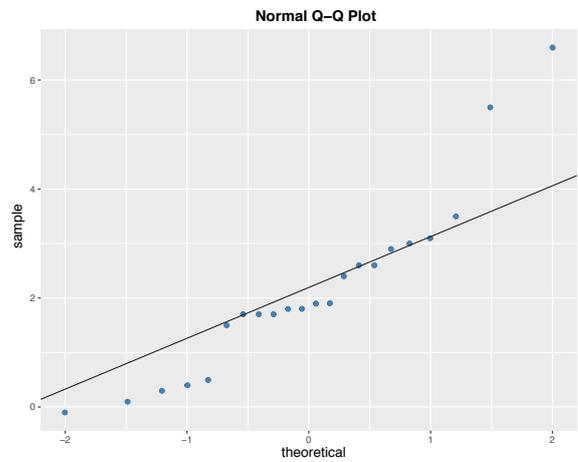


Figura 5.8: Cuantil normal estándar aplicado a la Temperatura del Aire
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La realización de la *prueba de normalidad* indicó que existe *un punto atípico*, el cual fue puesto en observación, tras utilizar el (*criterio nivel seis - inspección visual, validación de datos meteorológicos*), Figura 5.9.

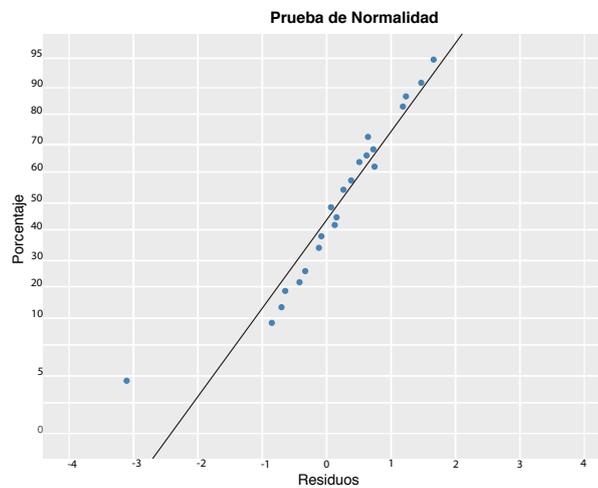


Figura 5.9: Prueba de Normalidad - Residuos Atípicos
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La realización de la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk* entregó como resultado el valor correspondiente para $w = 0,96$ y un $p\text{-valor} = 0,56$; por lo cual, se cumple la condición de:

$$p\text{-valor} > 0,05 \tag{5.4}$$

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Puesto lo anterior, se establece que *no* existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis, dado que el resultado de la prueba nos refleja una distribución *normal*.

Tal como se mencionó antes, se procedió a colocar en observación a los puntos atípicos, pudiendo incluso ser eliminados. Por este motivo, la tabla de temperaturas quedó conformada tal como se ejemplifica a continuación, ver Tabla 5.9.

Día	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	28	29	30	31
T °C Superficie	7,0	8,1	6,9	8,1	9,6	6,8	5,6	5,6	5,0	9,3	7,7	7,3	5,8	5,0	5,1	4,5	5,6	5,3	2,4	5,2	4,4	4,2
T °C del Aire	2,6	3,1	2,9	2,6	5,5	1,8	1,7	-0,1	1,9	6,6	3,5	3,0	1,9	1,5	2,4	0,3	1,8	0,5	1,7	1,7	0,4	0,1

Tabla 5.9: Las temperaturas corresponden al mes de mayo del año 2011, la observación del día 28 fue eliminada

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Una vez encasillados los datos de temperatura (*sin punto atípico*), se procedió a realizar nuevamente todo el análisis descrito anteriormente, con la finalidad de observar algún cambio significativo en los valores de correlación y predicción en esta nueva *regresión lineal simple*, ver Figura 5.10.

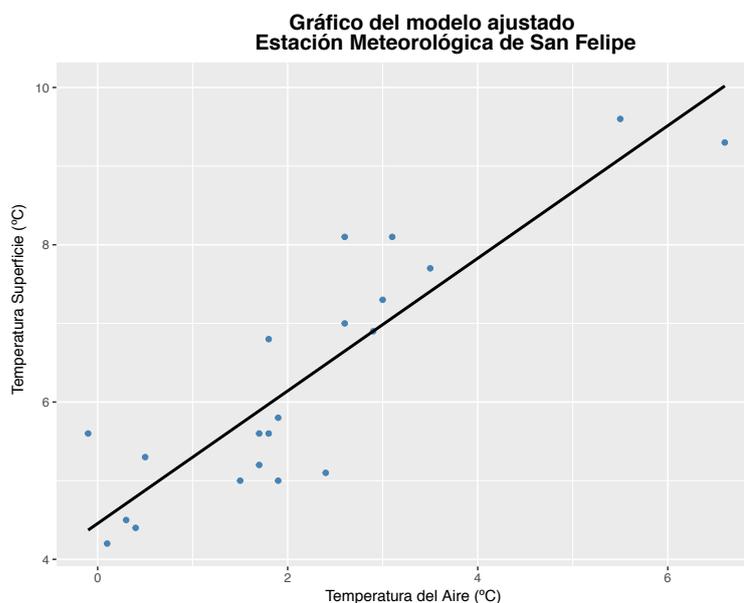


Figura 5.10: Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple sin puntos atípicos

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La aplicación y resultados de diversas pruebas estadísticas se pueden observar a continuación, ver Tabla 5.10 y Tabla 5.11.

<i>Estadísticas de la regresión</i>		<i>Correlación de Pearson</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,88	t	8,1
Coefficiente de correlación R ²	0,78	df	19
R ² ajustado	0,77	p-valor	1,3e - 07
Error estándar del estadístico	0,76	Intervalo de confianza 95 %	0,7 - 1,0
Error absoluto medio	0,61	Correlación estimada	0,88
Durbin Watson	1,7 (p = 0,2)		
Observaciones	21		

Tabla 5.10: Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es 0,78; lo que significó que el modelo de regresión lineal es *bueno*.

El *coeficiente de correlación múltiple* tiene un valor 0,89; el cual indicó una relación moderadamente fuerte y positiva entre las variables, por lo cual se puede considerar que cuando X aumenta, Y también tiende a aumentar.

La *correlación de Pearson* obtiene un valor igual a 0,88 lo cual indica que las variables están correlacionadas linealmente.

Dado que el *p-valor* es $< 0,05$ rechazo la hipótesis nula (H_0), por lo cual, acepto la hipótesis alternativa (H_1), que indica que *si existe* relación estadística significativa entre las variables (*temperatura de superficie y temperatura del aire*).

En este análisis, *el error estándar del estimado* obtuvo el valor 0,76.

Puesto que el *p-valor* es $< 0,05$; existe una relación estadísticamente significativa entre Y e X con un nivel de confianza del 95 %, ver Tabla 5.11.

El estadístico de *Durbin-Watson* examinó los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan en el archivo los datos. Puesto que el *p-valor* es $> 0,05$; no hay indicación de una autocorrelación serial de los residuos con un nivel de confianza del 95 %, existiendo entonces una *independencia de los residuos*.

<i>Coefficientes</i>				
	Coefficientes	Error de ajuste	IC de 95 %	IP de 95 %
Intercepto	4,5 °C	0,3	3,9 - 5,0	2,7 - 6,2
Pendiente	0,8 °C	0,1	0,6 - 1,1	

<i>Anova</i>					
	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor P
Regresión	1	39,2	39,2	66,2	0,0
Residuos	19	11,2	0,6		
Total	20	50,4			

Tabla 5.11: Valores obtenidos tras la realización de distintas pruebas estadísticas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Obtenidos los datos *coeficientes*, la ecuación correspondiente a la *regresión lineal* quedó construida de la siguiente manera;

$$Y = 4,5 + 0,8X \tag{5.5}$$

Se concluyó que la temperatura registrada por el sensor MODIS en superficie es igual a 4,5 °C, la temperatura del aire tuvo un valor *aproximado a 0 °C*.

Realizada la prueba de *Durbin-Watson* hipótesis alternativa, la autocorrelación verdadera es mayor que 0.

El *histograma* junto a la *curva de normalidad* indica que los residuos estandarizados siguen una distribución normal, ver Figura 5.11.

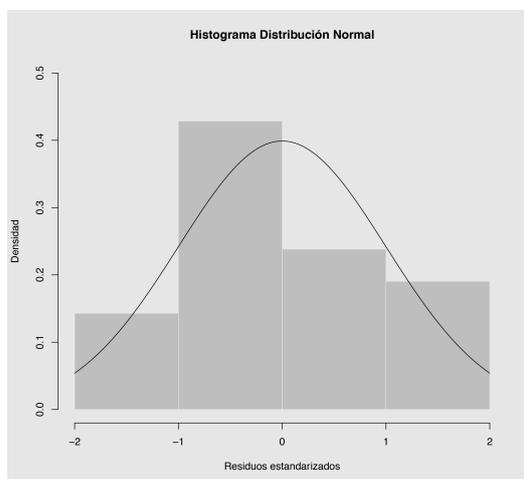


Figura 5.11: Distribución de Residuos Estandarizados
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

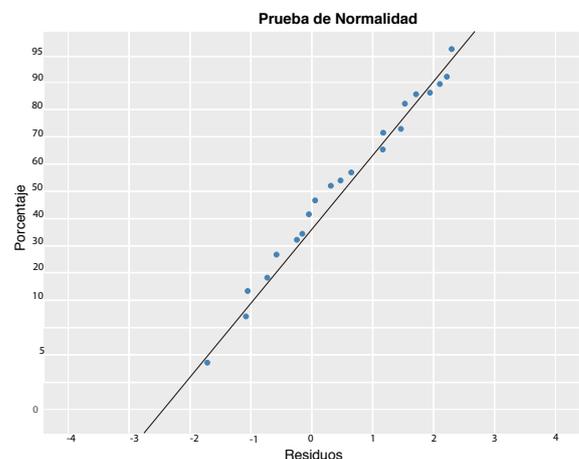


Figura 5.12: Prueba de Normalidad - Residuos Atípicos
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Realizada la prueba de *residuos atípicos*, *no* existen residuos estandarizados mayores a *dos* y para el caso de los *puntos influyentes*, sigue siendo *menor* la influencia para el punto del *día N°12*, por lo cual, *no* se considerará a este como un punto *atípico*.

Se puede definir mediante la *prueba de normalidad* que la distribución de los datos espacialmente siguen una cierta normalidad, además, de no presentar visualmente la presencia de algún punto *atípico*, ver Figura 5.12.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Al observar lo siguiente, se concluyó que existe una leve mejor *correlación lineal ajustada* a una recta entre las temperaturas en esta segunda regresión al eliminar este punto *atípico*, así como la obtención de una pequeña varianza residual, lo cual puede ser verificado al observar los valores estadísticos que se presentan a continuación, ver Tabla 5.12.

Estadísticas de la regresión		Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,81	Coefficiente de correlación múltiple	0,88
Coefficiente de correlación R ²	0,65	Coefficiente de correlación R ²	0,78
R ² ajustado	0,63	R ² ajustado	0,77
Error estandar del estadístico	1,07	Error estandar del estadístico	0,76
Error absoluto medio	0,72	Error absoluto medio	0,61
Durbin Watson	1,8 (p = 0,3)	Durbin Watson	1,7 (p = 0,2)
Observaciones	22	Observaciones	21

Tabla 5.12: Valores estadísticos comparativos entre datos con y sin presencia de Puntos Atípicos

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Sin embargo, se determinó que esta diferencia es mínima al observar los siguientes datos de temperatura al calibrar estos mediante los *coeficientes* obtenidos tras los ajustes de las regresiones lineales, ver Figura 5.13.

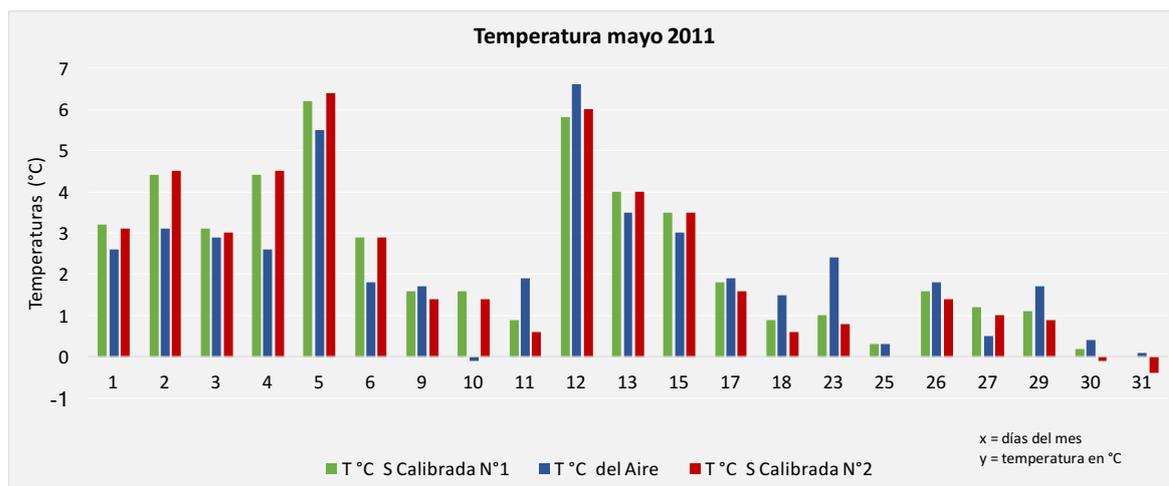


Figura 5.13: Resultado de las Temperaturas Calibradas al utilizar regresión lineal simple, mayo 2011

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

No obstante del resultado, se cumplió con el apartado considerado que trató acerca de la validación de los datos meteorológicos, ya que el punto eliminado, incumplió con los criterios de validación.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Anteriormente, la tabla Tabla 5.9 mostraba las temperaturas para el mes de mayo del año 2011. Una vez, considerados los coeficientes n y m , se procedió a calcular las temperaturas superficiales calibradas mediante:

$$TSC = (TS - n)/m \quad (5.6)$$

donde TSC corresponde a la Temperatura Superficial Calibrada con estos coeficientes procedentes del nuevo ajuste lineal, TS a la Temperatura de Superficie, $n = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (*intercepto*) y $m = 0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (*pendiente*), ver Figura 5.14 y Figura 5.15.

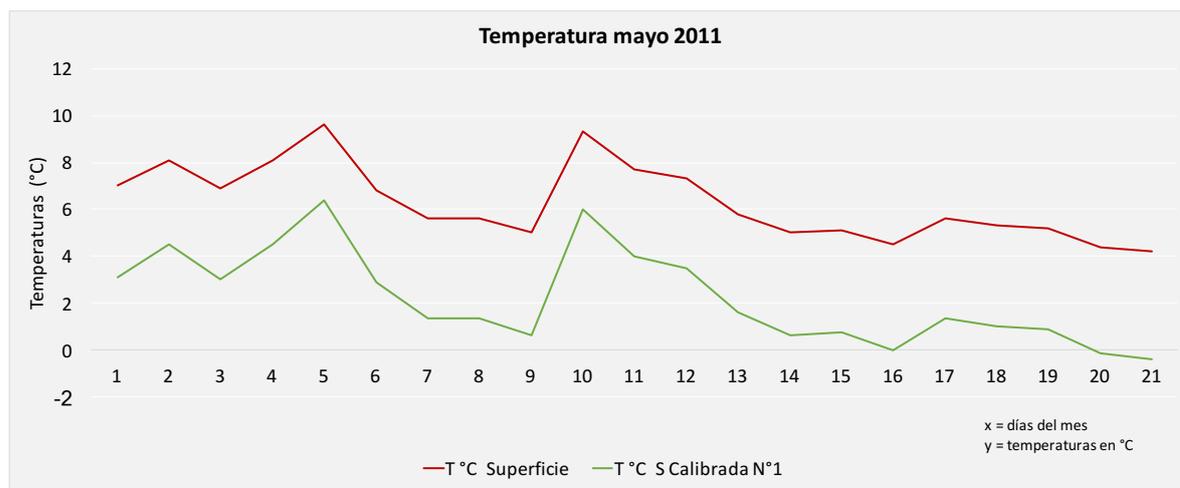


Figura 5.14: Este gráfico muestra una comparación entre las Temperaturas de Superficie v/s las Temperaturas de Superficie Calibradas

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Se efectuó una comparación entre la temperatura del aire (*meteorológica*) y la temperatura de la superficie calibrada obtenida, ver Tabla 5.13.

Día	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	29	30	31
T °C del Aire	2,6	3,1	2,9	2,6	5,5	1,8	1,7	-0,1	1,9	6,6	3,5	3,0	1,9	1,5	2,4	0,3	1,8	0,5	1,7	0,4	0,1
T °C Sup Calibrada	3,1	4,5	3,0	4,5	6,4	2,9	1,4	1,4	0,6	6,0	4,0	3,5	1,6	0,6	0,8	0,0	1,4	1,0	0,9	-0,1	-0,4

Tabla 5.13: Las temperaturas corresponden al mes de mayo del año 2011

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

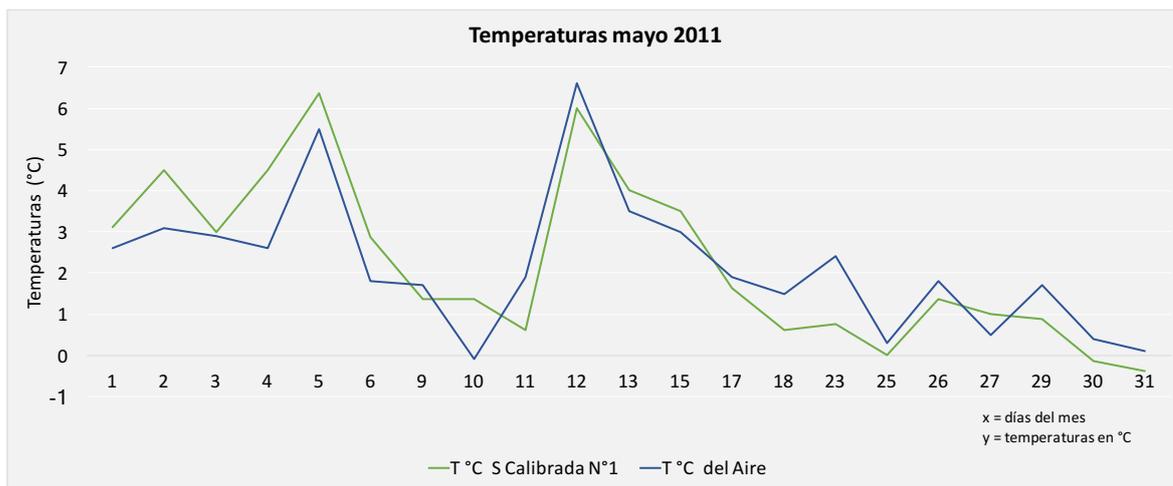


Figura 5.15: Comparación entre las Temperaturas del Aire v/s Temperatura de Superficie Calibrada

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Además, se obtuvo el promedio de las temperaturas mensuales para el año 2011 entre estas dos últimas temperaturas, ver Figura 5.16.

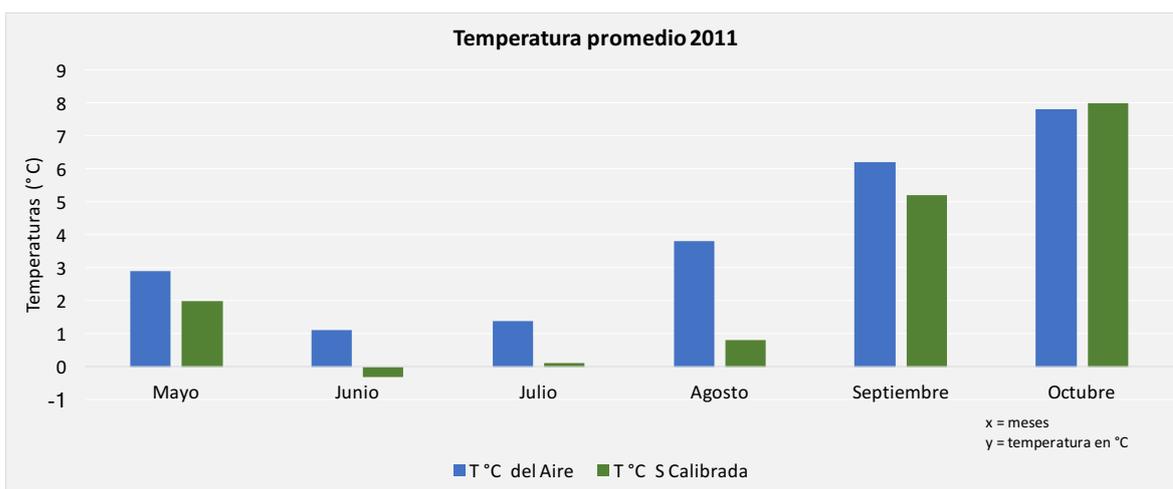


Figura 5.16: Promedio de temperaturas mensuales año

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Las siguientes imágenes muestran un resumen de las regresiones lineales simples para el periodo 2011-2015 en la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, determinándose cada ajuste lineal con sus respectivos coeficientes, apreciándose la determinación de la *temperatura umbral mensual* para cada mes.

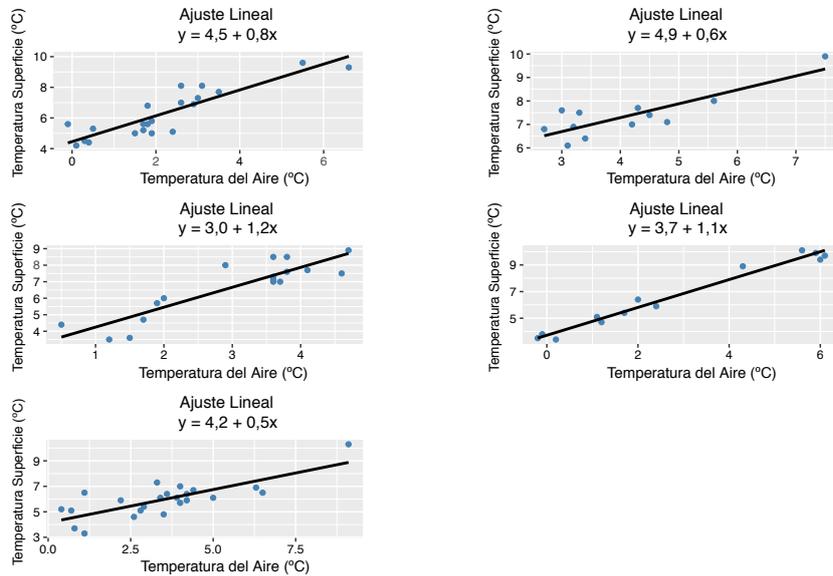


Figura 5.17: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de mayo 2011 - 2015

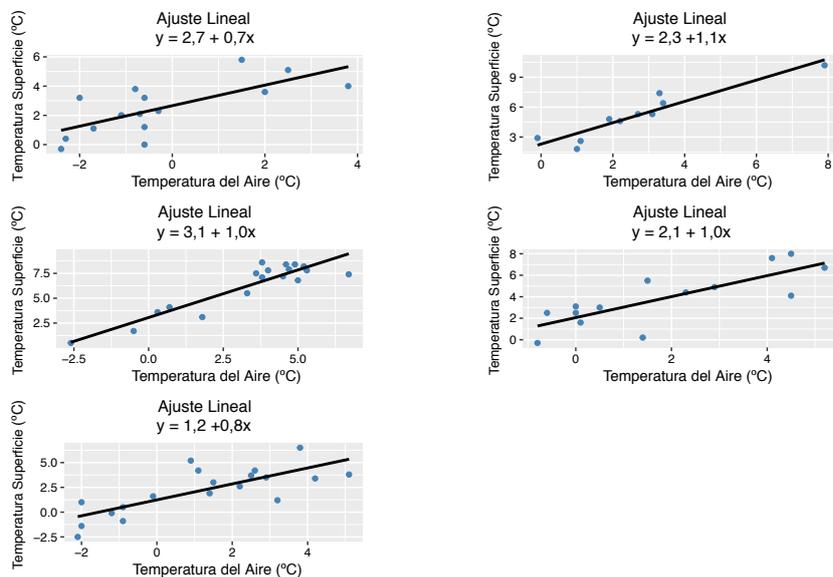


Figura 5.18: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de junio 2011 - 2015

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

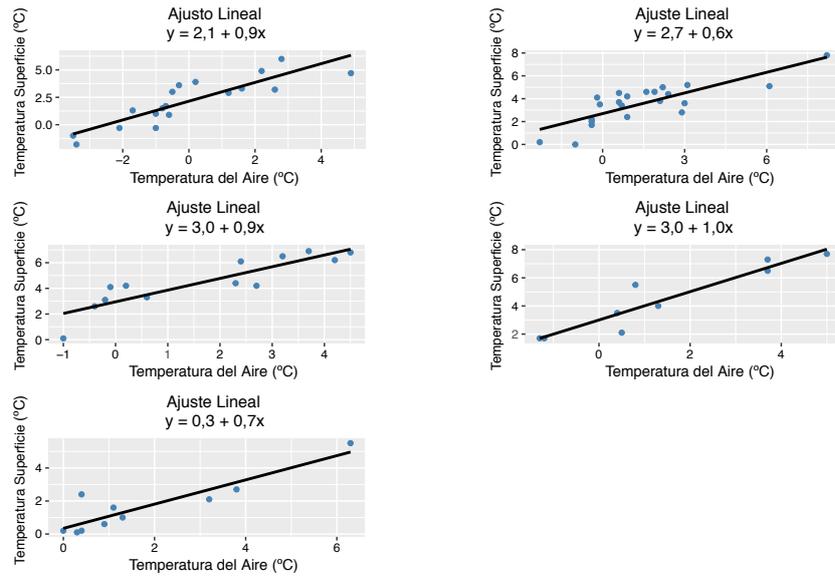


Figura 5.19: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de julio 2011 - 2015

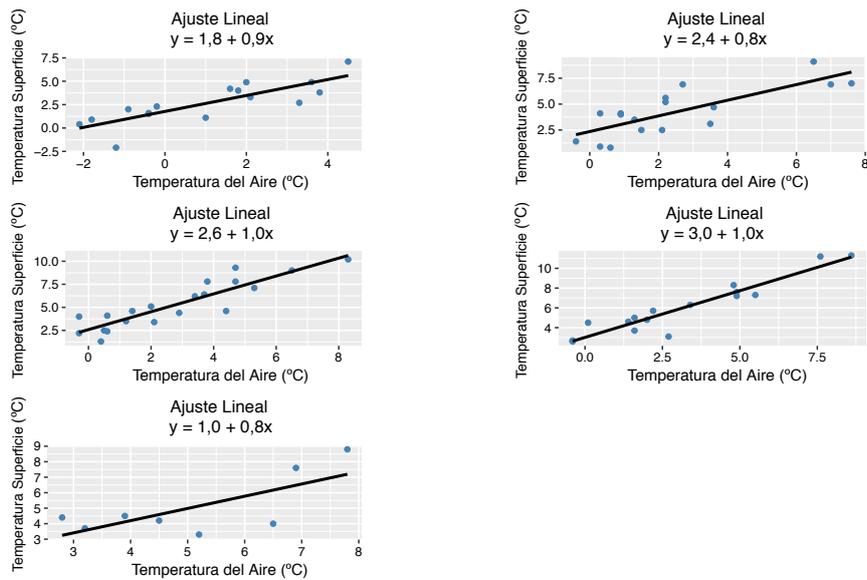


Figura 5.20: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de agosto 2011 - 2015

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

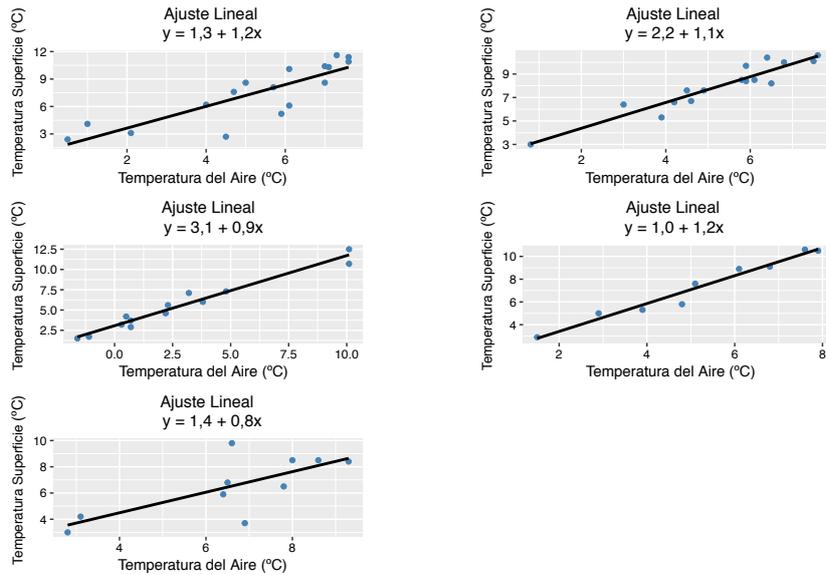


Figura 5.21: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de septiembre 2011 - 2015

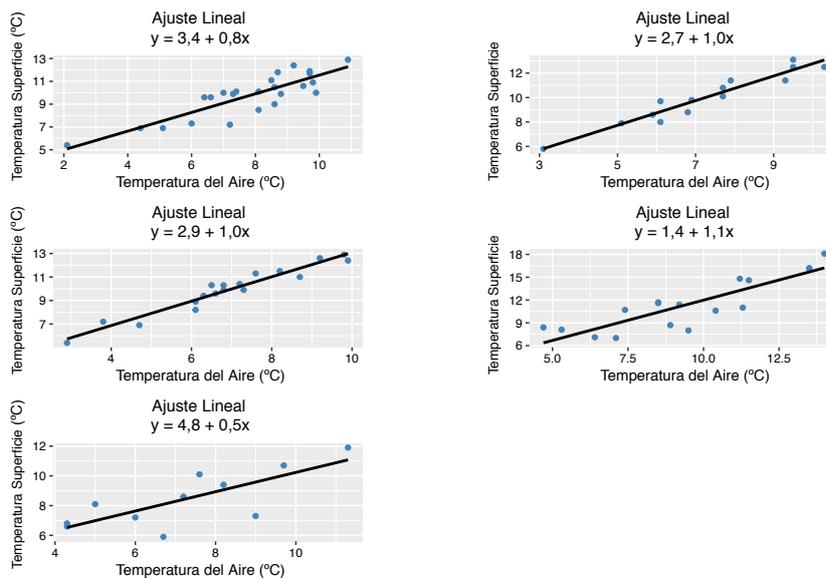


Figura 5.22: Ajuste por medio de una regresión lineal simple para el mes de octubre 2011 - 2015

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Se realizaron pruebas estadísticas idénticas a la estación meteorológica anterior, a fin de comparar o identificar algún parámetro en la predicción de temperaturas entre estaciones cercanas.

La siguiente estación meteorológica se ubicó en la comuna de Los Andes, Tabla 5.14.

<i>Estación Meteorológica</i>	
Norte	6 366 425 metros
Este	350 240 metros
Altura	834 metros

Tabla 5.14: Ubicación de la estación meteorológica, sistema de coordenadas UTM - Datum WGS 84 huso 19 sur

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

De esta estación, se desprenden los siguientes datos de temperatura para el mes de mayo del año 2011, ver Tabla 5.15.

Día	1	2	3	4	6	9	10	11	12	13	15	16	17	18	23	25	26	27	29	31
T °C Superficie	4,1	4,6	4,5	4,5	4,5	3,5	4,6	3,9	5,6	5,0	5,4	3,3	4,6	4,0	3,3	1,5	3,2	2,4	2,9	1,4
T °C del Aire	5,2	5,7	5,5	5,0	5,5	3,1	5,0	4,7	7,0	4,9	4,2	3,7	3,8	4,5	4,3	1,5	1,7	2,5	2,3	0,7

Tabla 5.15: Las temperaturas corresponden al mes de mayo del año 2011

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

Realizada la tabulación de los datos, se procedió a graficar para conocer su distribución e identificar algún tipo de comportamiento visual, ver Figura 5.23.

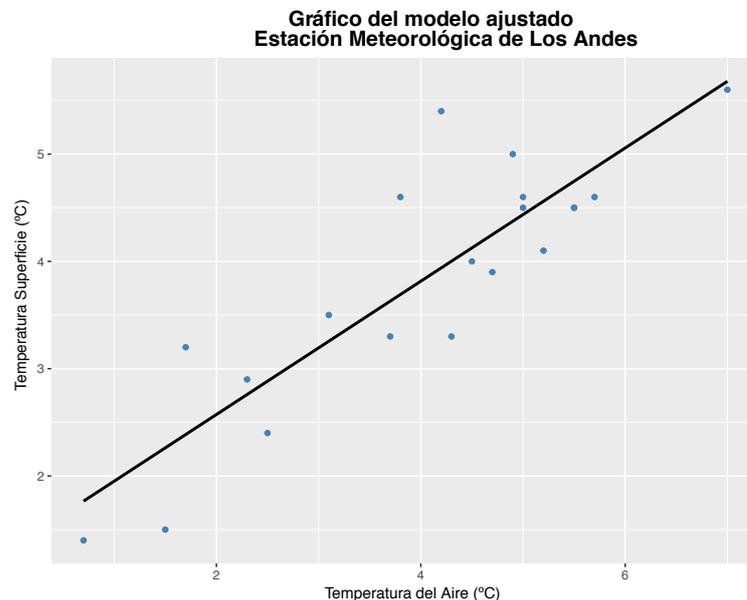


Figura 5.23: Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

Se consideraron los siguientes indicadores estadísticos, ver Tabla 5.16 y Tabla 5.17.

<i>Estadísticas de la regresión</i>		<i>Correlación de Pearson</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,87	t	7,47
Coefficiente de correlación R ²	0,76	df	18
R ² ajustado	0,74	p-valor	6,4e - 07
Error estandar del estadístico	0,58	Intervalo de confianza 95 %	0,7 - 0,9
Error absoluto medio	0,44	Correlación estimada	0,87
Durbin Watson	2,1 (p = 0,5)		
Observaciones	20		

Tabla 5.16: Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes

<i>Coefficientes</i>				
	Coefficientes	Error de ajuste	IC de 95 %	IP de 95 %
Intercepto	1,4 °C	0,4	0,6 - 2,1	-0,1 - 2,8
Pendiente	0,6 °C	0,1		

<i>Anova</i>					
	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor P
Regresión	1	19,3	19,3	55,7	0,0
Residuos	18	6,2	0,3		
Total	19	25,5			

Tabla 5.17: Valores obtenidos tras la realización de distintas pruebas estadísticas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

Obtenidos los datos *coeficientes*, la ecuación correspondiente a la *regresión lineal* queda construida de la siguiente manera;

$$Y = 1,4 + 0,6X \quad (5.7)$$

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Al considerar el valor de los coeficientes de *intercepto* y la *pendiente*, se calibraron los datos de temperatura de superficie, obteniendo los siguientes datos, ver Tabla 5.18 y Figura 5.24.

Día	1	2	3	4	6	9	10	11	12	13	15	16	17	18	23	25	26	27	29	31
T °C del Aire	5,2	5,7	5,5	5,0	5,5	3,1	5,0	4,7	7,0	4,9	4,2	3,7	3,8	4,5	4,3	1,5	1,7	2,5	2,3	0,7
T °C Superficie Calibrada	4,5	5,3	5,1	5,1	5,1	3,5	5,3	4,2	6,9	6,0	6,6	3,2	5,4	4,3	3,2	0,2	3,1	1,7	2,6	0,2

Tabla 5.18: Comparación entre las Temperaturas del Aire y Temperatura de Superficie Calibrada, comuna de Los Andes

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

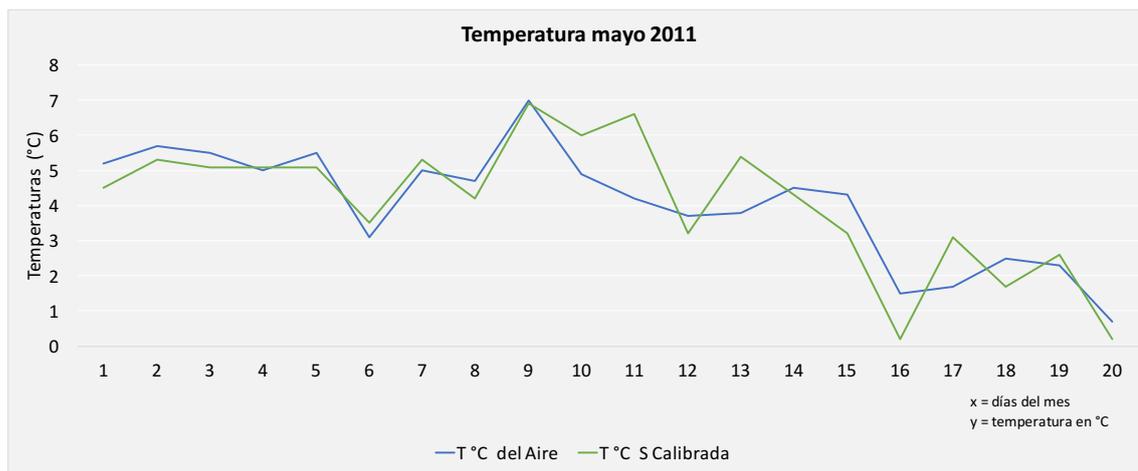


Figura 5.24: Comparación entre las Temperaturas del Aire v/s Temperaturas de Superficie Calibradas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

La siguiente estación meteorológica se ubicó en la comuna de La Cruz, ver Tabla 5.19.

<i>Estación Meteorológica</i>	
Norte	6 366 242 metros
Este	291 206 metros
Altura	153 metros

Tabla 5.19: Ubicación de la estación meteorológica, sistema de coordenadas UTM - Datum WGS 84 huso 19 sur

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

De esta estación, se desprenden los siguientes datos de temperatura para el mes de mayo del año 2011, ver Tabla 5.20.

Día	1	3	4	5	9	12	18	23	26	27	29	30
T °C Superficie	8,7	5,8	5,1	7,6	5,7	5,0	8,0	4,1	3,7	6,9	5,1	5,3
T °C Atmósfera	7,4	3,2	3,1	3,3	4,0	2,0	6,4	2,7	0,7	2,0	2,2	3,0

Tabla 5.20: Las temperaturas corresponden al mes de mayo del año 2011

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

Realizada la tabulación de los datos, se procedió a graficar para conocer su distribución e identificar algún tipo de comportamiento visual, ver Figura 5.25.

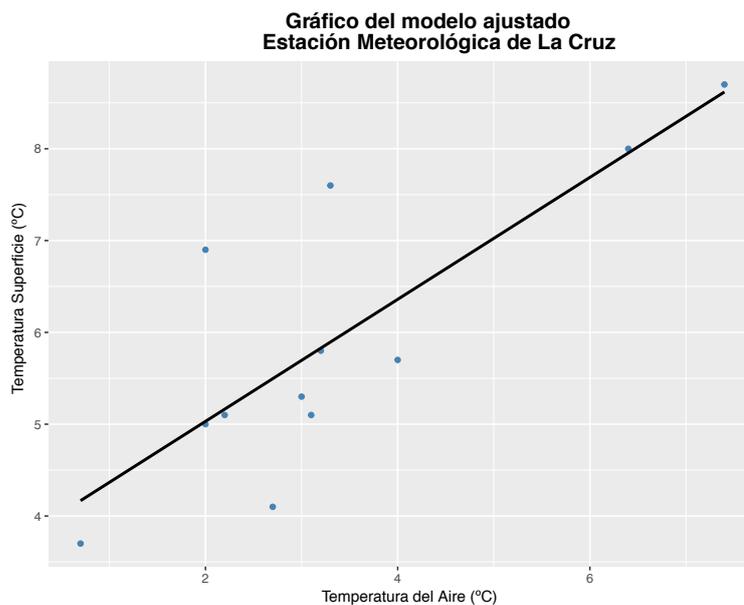


Figura 5.25: Puntos ajustados a través de una regresión lineal simple.

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

Se consideraron los siguientes indicadores estadísticos, ver Tabla 5.21 y Tabla 5.22.

<i>Estadísticas de la regresión</i>		<i>Correlación de Pearson</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,8	t	4,22
Coefficiente de correlación R ²	0,64	df	10
R ² ajustado	0,6	p-valor	0,002
Error estandar del estadístico	0,98	Intervalo de confianza 95 %	0,4 - 0,9
Error absoluto medio	0,62	Correlación estimada	0,8
Durbin Watson	2,5 (p = 0,8)		
Observaciones	12		

Tabla 5.21: Valores obtenidos mediante diversas pruebas estadísticas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

<i>Coefficientes</i>				
	Coefficientes	Error de ajuste	IC de 95 %	IP de 95 %
Intercepto	3,7 °C	0,6	1,1 - 6,3	2,4 - 5,0
Pendiente	0,7 °C	0,2		

<i>Anova</i>					
	Grado de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor P
Regresión	1	17,1	17,1	17,8	0,0
Residuos	10	9,6	1,0		
Total	11	26,7			

Tabla 5.22: Valores obtenidos tras la realización de distintas pruebas estadísticas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

Obtenidos los datos *coeficientes*, la ecuación correspondiente a la *regresión lineal* queda construida de la siguiente manera;

$$Y = 3,7 + 0,7X \quad (5.8)$$

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

Al utilizar el valor de los coeficientes del *intercepto* y la *pendiente*, se calibraron los datos de temperatura de superficie, obteniendo los siguientes datos, ver Tabla 5.23 y Figura 5.26.

Día	1	3	4	5	9	12	18	23	26	27	29	30
T °C del Aire	7,4	3,2	3,1	3,3	4,0	2,0	6,4	2,7	0,7	2,0	2,2	3,0
T °C Sup Calibrada	7,5	3,2	2,1	5,9	3,0	2,0	6,5	0,6	0,0	4,8	2,1	2,4

Tabla 5.23: Comparación entre las Temperaturas del Aire v/s Temperaturas de Superficie Calibradas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

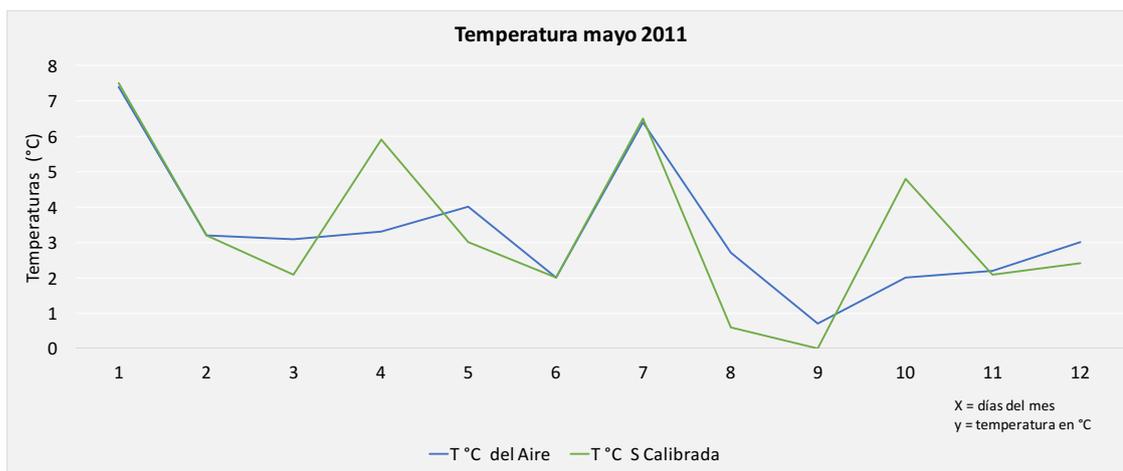


Figura 5.26: Comparación entre las Temperaturas del Aire v/s Temperaturas de Superficie Calibradas

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

A continuación, se describió un resumen con el número de heladas determinada por la estación meteorológica (*temperatura del aire*), temperatura obtenida a través de MODIS (*temperatura de superficie*) y la temperatura de superficie corregida para la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, para el periodo comprendido entre los años 2011-2015 y su correspondiente *Probabilidad de Ocurrencia*.

N° heladas				Probabilidades			
Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida	Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida
mayo	1	0	3	mayo	0,03	0	0,10
junio	16	1	9	junio	0,53	0,03	0,30
julio	13	4	10	julio	0,42	0,13	0,32
agosto	7	1	7	agosto	0,23	0,03	0,23
septiembre	0	0	0	septiembre	0	0	0
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 5.24: Resumen de número probabilidad de heladas año 2011

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

N° heladas				Probabilidades			
Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida	Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida
mayo	0	0	0	mayo	0	0	0
junio	1	0	1	junio	0,03	0	0,03
julio	8	0	7	julio	0,30	0	0,23
agosto	1	0	3	agosto	0,03	0	0,10
septiembre	0	0	0	septiembre	0	0	0
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 5.25: Resumen de número probabilidad de heladas año 2012

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

N° heladas				Probabilidades			
Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida	Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida
mayo	0	0	0	mayo	0	0	0
junio	3	0	3	junio	0,10	0	0,10
julio	5	0	2	julio	0,20	0	0,06
agosto	2	0	4	agosto	0,06	0	0,13
septiembre	2	0	3	septiembre	0	0	0,10
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 5.26: Resumen de número probabilidad de heladas año 2013

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

5.3 VALIDACIÓN DE DATOS MYD11A1-V5

N° heladas				Probabilidades			
Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida	Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida
mayo	2	0	2	mayo	0,06	0	0,06
junio	3	1	3	junio	0,10	0,03	0,10
julio	2	0	4	julio	0,06	0	0,13
agosto	2	0	3	agosto	0,06	0	0,10
septiembre	0	0	0	septiembre	0	0	0
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 5.27: Resumen de número probabilidad de heladas año 2014

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

N° heladas				Probabilidades			
Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida	Mes	T °C del aire	T °C superficie	T °C s corregida
mayo	0	0	4	mayo	0	0	0,13
junio	7	4	6	junio	0,23	0,13	0,20
julio	0	0	0	julio	0	0	0
agosto	0	0	0	agosto	0	0	0
septiembre	0	0	0	septiembre	0	0	0
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 5.28: Resumen de número probabilidad de heladas año 2015

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Las imágenes siguientes correspondieron al mes de octubre del año 2015, donde la primera ejemplificó la temperatura de superficie captada por el sensor MODIS y la segunda imagen contempla las temperaturas de superficie ya calibradas, por lo cual, se aprecia el aumento de superficie predispuesta a ocurrencia de helada, dado que el umbral seleccionado para este mes correspondió a 4,8 °C, ver Figura 5.27 y Figura 5.28.

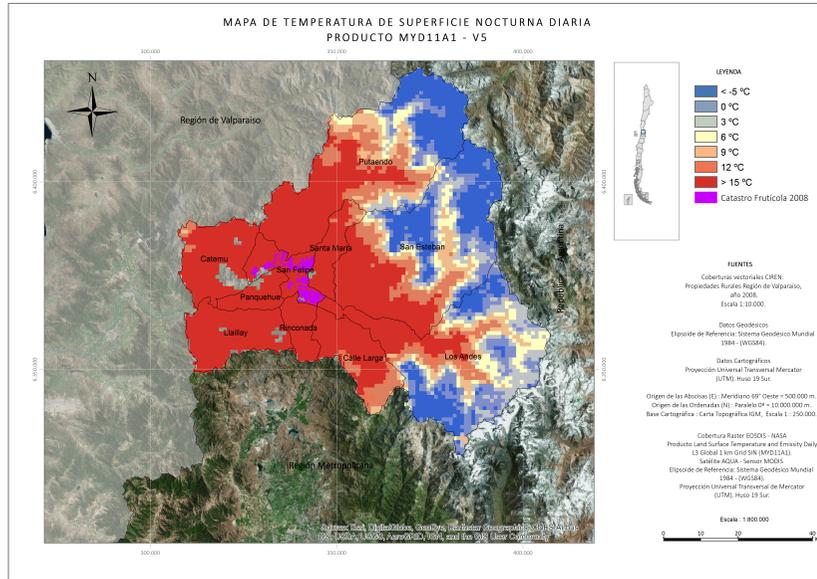


Figura 5.27: Temperatura de Superficie para el mes de octubre año 2015
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

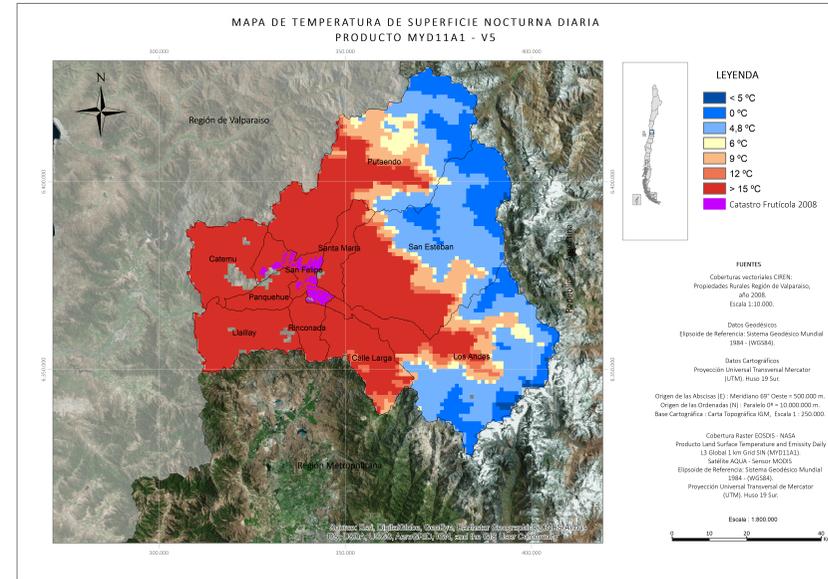


Figura 5.28: Temperatura de Superficie Calibrada para el mes de octubre año 2015
Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

5.3.2. Conclusiones del Capítulo

En el presente capítulo, se consiguió observar y encontrar una rápida tendencia a obtener correlaciones positivas entre las TS y TA en tres estaciones meteorológicas abordadas en este estudio, por lo cual, se logró una buena predicción y estimación entre variable predictora y de respuesta al utilizar el ajuste de estos valores mediante regresiones lineales simples y el método de mínimos cuadrados.

Los coeficientes de correlación y determinación entre TS y TA estuvieron condicionadas en cada estación meteorológica por cambios atmosféricos, de estación del año y geográficos.

En este capítulo, con la finalidad de aportar más precisión al desarrollo de la metodología se contempló considerar el tiempo y el dato de la TA de cada estación meteorológica con el momento aproximado del paso del satélite por dicha estación. No obstante, esta situación minimizó notablemente la cantidad de datos, dado que la mayoría de las estaciones meteorológicas contienen solo datos históricos de las temperaturas máximas - mínimas y, estas últimas no corresponden a la hora del paso del satélite Aqua/MODIS por nuestro territorio.

Cada estación, geográficamente posee características distintas de nubosidad, humedad, altura, latitud, distancia al mar, entre otras; motivos por el cual cada una de estas debe ser evaluada de forma particular e individual. Por lo cual, se consideró como aspecto de suma importancia, revisar diariamente los valores registrados en las bases de datos de las estaciones meteorológicas, principalmente porque muchas de estas bases de datos son generadas por estaciones meteorológicas automáticas o EMAS que aún están en fases de calibración y sus datos pueden presentar constantes puntos atípicos al momento de realizar un modelo o estimaciones de umbrales de temperatura, los cuales pueden ser incorrectos y por ende, presentar errores significativos a la hora de suministrar el dato.

Las diferencias de valor ya conocidas entre la temperatura de superficie y del aire, se deben sin duda a lo poco homogéneo del lugar en donde son instaladas las estaciones meteorológicas, adicionándose a que el tamaño del píxel de la imagen satelital tiene un kilómetro de resolución espacial, lo que conlleva que promediará en más de alguna circunstancia lugares con distinto tipo de cobertura terrestre y vegetación.

Además, existen ciertas limitaciones de valor al entregar la temperatura de superficie por parte del sensor del satélite, dado que coexisten diversas perturbaciones atmosféricas tales como fenómenos de absorción y dispersión atmosférica, los cuales afectan a la propagación de las ondas electromagnéticas, absorbiendo parte de la energía y esparciendo en diferentes direcciones esta energía. Para cada cubierta, el comportamiento espectral (forma de reflejar energía) en las distintas longitudes de onda no es homogéneo, variando principalmente en función de factores tales como la humedad, la textura, la composición química, el contenido de materia orgánica, la pendiente, la orientación solar, entre otros; adicionando que la banda infrarroja termal se ve limitada notablemente por la presencia de nubes y lluvia.

Finalmente, se describió un resumen de las ocurrencias de heladas pronosticadas por las estaciones meteorológicas, los datos de temperatura de superficie y los datos de temperatura de superficie calibrados, reflejándose que los eventos de heladas ocurridos mantienen una relación bastante directa a lo que se puede estimar al utilizar las temperaturas superficiales calibradas mediante el uso de la regresión lineal.

CAPÍTULO 6

INTEGRACIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS

6.1. Análisis Multivariable

En el capítulo anterior, se consideró correlaciones entre dos variables y las predicciones que se pueden realizar sobre una de ellas a partir del conocimiento de los valores de la otra variable, es decir, se pronosticaron valores determinados de la variable TS en función de valores que se obtenían de la variable explicativa TA.

Por consiguiente, la *predicción* de una variable como es la TS a partir del conocimiento de tan solo una única variable TA, consiguió posiblemente entregar como resultado un análisis demasiado contenido. Por ello, es que en este capítulo, se buscó integrar nuevas (*variables explicativas*) introducidas como variables meteorológicas, cuya finalidad fue de determinar y cuantificar si con este conjunto de variables independientes afectó o no y de qué manera a la *variable dependiente* ya predicha. Dado, que es importante el demostrar si estas nuevas variables aumentan la relación entre la TS y la TA. Para esto, se realizaron *regresiones lineales múltiples*, con las cuales se quiso observar la posible relación entre las variables *predictoras* y la variable *respuesta*.

Finalmente, se buscó la reducción del número de estas variables, al eliminar a aquellas con un menor aporte significativo al modelo y, considerar las que mejor interpretan los datos resultantes.

6.2. Descripción de nuevas variables

Para términos de la Organización para Estudios Tropicales (OET) y la OMM y sus estaciones biológicas, los elementos mínimos que se deben de capturar en las necesidades de respaldar y facilitar las investigaciones científicas son la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, el viento, la precipitación y la radiación.

Cabe señalar que solo se definieron a aquellas que se consideraron como nuevas variables independientes para el modelo.

6.2.1. Temperatura

La *temperatura* es la condición que determina la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos. Esta magnitud permite expresar el grado de calentamiento o enfriamiento de los cuerpos (OMM, 2010).

La temperatura termodinámica (T) expresada en grados Kelvin es la temperatura básica. En meteorología, se utiliza casi siempre la temperatura (t) expresada en grados Celsius, definida por la ecuación:

$$t = T - 273,16 \quad (6.1)$$

La meteorología utiliza algunas variables basadas en la temperatura, las cuales pueden ser divididas en *primarias* (*temperatura del aire medida a 1,5 m de altura*) y las *secundarias* (*temperatura máxima y mínima del aire a 1,5 m por un periodo de 24 horas*).

6.2.2. Humedad

Se define por *humedad relativa* a la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica, siendo esta la forma más habitual de expresar la humedad ambiental (*la cantidad de vapor de agua presente en el aire*). Su unidad estándar válida para el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el *porcentaje* (%).

El rango establecido por la OMM para las observaciones de humedad relativa comprende entre el 5-100%.

6.2.3. Presión Atmosférica

La *presión atmosférica* es la presión que ejerce el peso de toda la masa de una columna de aire sobre un nivel dado (Inzunza, 2000).

La unidad estándar válida para el Sistema Internacional es el *Pascal (Pa)*, que es equivalente a un *Newton* por metro cuadrado. Es importante mencionar que muchos de los barómetros vienen graduados en *milibares (mb)*, un milibar es equivalente a cien *pascales*, lo que es lo mismo que un *hectopascal*.

El rango establecido por la OMM para las observaciones de presión atmosférica es de 980 – 1 080 hPa.

6.2.4. Viento

El *viento* consiste en el movimiento de aire desde una zona hasta otra. Existen diversas causas que pueden provocar la existencia del viento, pero normalmente se origina cuando entre dos puntos se establece una cierta diferencia de presión o de temperatura (Jiménez *et al.*, 2004).

La unidad estándar para la dirección del viento se da en grados dextrósum (*es decir en sentido de las agujas del reloj*) a partir del norte o en la escala 0 - 36 ó 0 - 360 donde 36 ó 360 es el viento norte y 09 ó 90 es el viento del este.

Las unidades reconocidas por el SI son:

- Velocidad del viento: *m/s*.
- Dirección del viento: *grados*.
- Ráfaga del viento: *m/s*.

El rango operacional para las observaciones de velocidad del viento y dirección dadas por el OMM son las siguientes:

- Velocidad promedio del viento: 0 - 70 m/s.
- Ráfagas del viento: 5 - 75 m/s.
- Dirección del viento: $> 0^\circ$ y $\leq 360^\circ$.

6.2.5. Precipitación

Se definió como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o el aire y se deposita en suelo (OMM, 2010).

La unidad de la precipitación normalmente está designada en *milímetros* para la precipitación líquida.

La variable típica es la *cantidad* de precipitación, la que se refiere a la cantidad de litros de agua que caen en un periodo de tiempo por *metro cuadrado*, ya sea de forma líquida o sólida.

6.3. Regresión lineal múltiple

El modelo de *regresión lineal múltiple* es similar al modelo de regresión lineal simple, excepto que contienen más términos y pueden ser utilizados para relaciones más complejas que una línea recta. Estas incluyen más de un término o variable explicativa.

En definitiva, y al igual que en una regresión lineal simple, se consideró que los valores de la variable dependiente Y se generaron por una combinación lineal de los valores de una o más variables explicativas y un término aleatorio (Abuín, 2007).

Un modelo de regresión múltiple se expresa de manera general como:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \cdots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (6.2)$$

donde:

Y_i es la i –ésima observación de la variable aleatoria dependiente.

X_{i1}, \dots, X_{ik} son las i –ésima observaciones de las variables fijas independientes.

$\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los llamados *coeficientes de regresión*.

ε_i es la variable aleatoria error o de perturbación.

Para determinar el modelo anterior, es necesario encontrar (*estimar*) el valor de los coeficientes $\beta_0 + \beta_1 + \cdots + \beta_k$. La linealidad en parámetros posibilita la interpretación correcta de los parámetros del modelo. Los parámetros miden la intensidad media de los efectos de las variables explicativas sobre la variable a explicar y se obtienen al tomar las derivadas parciales de la variable a explicar respecto a cada una de las variables explicativas:

$$\beta_j = \frac{\Delta Y}{\Delta X}; j = 1, \dots, k \quad (6.3)$$

Dado que el objetivo principal es asignar valores numéricos a los parámetros $\beta_0 + \beta_1 + \cdots + \beta_k$. Es decir, tratar de *estimar* el modelo de manera que, los valores ajustados de la variable independiente resulten próximos a los valores realmente observados como sea posible.

6.3.1. Estimación del modelo de regresión lineal

El método de mínimos cuadrados es utilizado para estimar los parámetros en el modelo de regresión lineal múltiple.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i \quad (6.4)$$

donde:

\mathbf{Y} es el vector de observaciones.

\mathbf{X} es una matriz $n \times p$ de niveles de la variable regresora.

β es un vector $p \times 1$ de coeficientes de regresión.

ε es el vector aleatorio error de orden $p \times 1$.

La ventaja de resolver por el *método de mínimos cuadrados* es que se obtendrán medidas de ajuste confiables para R y R^2 .

Para solucionar las ecuaciones normales se requiere que exista la inversa de la matriz $\mathbf{X}'\mathbf{X}$.

Esta existe siempre que las variables regresoras sean linealmente independientes. Así, la solución de mínimos cuadrados de vector paramétrico β está dada por:

$$\hat{\mathbf{b}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{Y} \quad (6.5)$$

Donde $\hat{\mathbf{b}}$ es el vector de estimación de los coeficientes, Y es el vector de las variables dependientes, X es la matriz de variables dependientes y X' es la traspuesta de X .

6.4. Integrando las nuevas variables

Los siguientes datos correspondieron a distintas variables meteorológicas, tanto *independientes* como *dependiente*, registradas durante el mes de mayo del año 2011 para la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe, ver Tabla 6.1.

La incorporación de todas estas variables, obedeció la intención de conocer si por medio de nuevos datos de entrada era posible *estimar* con más certeza la *variable dependiente*.

Día	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	29	30	31
T °C Superficie	7,0	8,1	6,9	8,1	9,6	6,8	5,6	5,6	5,0	9,3	7,7	7,3	5,8	5,0	5,1	4,5	5,6	5,3	5,2	4,4	4,2
T °C del Aire	2,6	3,1	2,9	2,6	5,5	1,8	1,7	-0,1	1,9	6,6	3,5	3,0	1,9	1,5	2,4	0,3	1,8	0,5	1,7	0,4	0,1
T °C Rocío	0,0	-1,3	-1,8	-2,8	-3,0	0,3	-1,6	-2,6	0,6	-2,3	-1,5	0,6	-0,1	-0,2	1,2	-1,1	-3,9	-3,4	-3,2	-5,1	-6,6
Viento (m/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Humedad R (%)	84,0	73,1	71,3	67,7	54,7	89,9	78,5	83,3	90,8	53,1	70,1	84,3	86,5	88,3	92,1	90,6	66,4	75,6	70,4	67,1	60,8
Presión (mb)	939	939	939	938	936	938	936	936	941	937	940	941	939	941	940	945	941	942	938	937	939

Tabla 6.1: Variables consideradas para una regresión lineal múltiple

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La ecuación ajustada de la *regresión lineal múltiple*, se construyó a partir de los coeficientes resultantes obtenidos tras la incorporación de todas las variables predictoras, la cual utilizó el método de *mínimos cuadrados*, ver Tabla 6.2.

$$Y_i = 100,1 - 0,7 * \beta_1 + 1,7 * \beta_2 - 2,4 * \beta_3 - 0,3 * \beta_4 - 0,1 * \beta_5 \quad (6.6)$$

donde β_1 es la temperatura del aire en °C, β_2 es la temperatura del rocío en °C, β_3 es la velocidad del viento en m/s, β_4 es la humedad relativa en % y β_5 es la presión atmosférica expresada en mb.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-valor
Constante	100,1	84,5	1,2	0,3
T °C del Aire	-0,7	1	-0,7	0,5
T °C Rocío	1,7	1,2	1,4	0,2
Velocidad del viento (m/s)	-2,4	4,0	-0,6	0,6
Humedad Relativa (%)	-0,3	0,2	-1,5	1,7
Presión (mb)	-0,1	0,1	-0,8	0,5

Tabla 6.2: Resumen estadístico de la regresión

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Para evaluar las *bondades* del modelo propuesto, se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos, ver Tabla 6.3.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,82
R^2 (ajustado para g.l)	0,76
Error estándar del estadístico	0,78
Error absoluto medio	0,60
Estadístico Durbin Watson	2,3 (p = 0,6)
Observaciones	21

Tabla 6.3: Análisis del modelo de regresión

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es 0,82; lo que significó al considerar este indicador que el modelo de regresión lineal múltiple es *bueno*. Además, la inserción de estas nuevas variables explicativas contribuyó a mejorar (*en una primera instancia*) el ajuste de la correlación de la temperatura satelital obtenida a través del sensor MODIS. Se cita, que con anterioridad el coeficiente R^2 tuvo un valor igual a 0,78; ver Tabla 5.10.

No obstante, al observar detenidamente la Tabla 6.1, se determinó que existen *variables independientes* que tienen un mínimo aporte *significativo* a la ecuación. Por ejemplo, la variación de la variable *viento* dentro del mes tendió a un valor igual a cero, los valores de la variable *presión* tienen una variabilidad dentro de un rango de seis unidades, entre otros. Por lo cual, se procedió a realizar nuevamente la *regresión lineal múltiple*, la que consideró las siguientes *variables independientes*, ver Tabla 6.4.

Día	1	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	29	30	31
T °C Superficie	7,0	8,1	6,9	8,1	9,6	6,8	5,6	5,6	5,0	9,3	7,7	7,3	5,8	5,0	5,1	4,5	5,6	5,3	5,2	4,4	4,2
T °C del Aire	2,6	3,1	2,9	2,6	5,5	1,8	1,7	-0,1	1,9	6,6	3,5	3,0	1,9	1,5	2,4	0,3	1,8	0,5	1,7	0,4	0,1
T °C Rocío	0,0	-1,3	-1,8	-2,8	-3,0	0,3	-1,6	-2,6	0,6	-2,3	-1,5	0,6	-0,1	-0,2	1,2	-1,1	-3,9	-3,4	-3,2	-5,1	-6,6
Humedad R (%)	84,0	73,1	71,3	67,7	54,7	89,9	78,5	83,3	90,8	53,1	70,1	84,3	86,5	88,3	92,1	90,6	66,4	75,6	70,4	67,1	60,8

Tabla 6.4: Nuevas variables consideradas para una regresión lineal múltiple

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

La ecuación ajustada de la *regresión lineal múltiple*, fue construida nuevamente a partir de los coeficientes resultantes obtenidos tras la selección de solo algunas variables predictoras, para lo cual, se utilizó el método de *mínimos cuadrados*, ver Tabla 6.5.

$$Y_i = 37,1 - 0,7 * \beta_1 + 1,8 * \beta_2 - 0,3 * \beta_3 \quad (6.7)$$

donde β_1 es la temperatura del aire en °C, β_2 es la temperatura del rocío en °C y β_3 es la humedad relativa en %.

Para evaluar las *bondades* del modelo propuesto, se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos, ver Tabla 6.6.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,85
R^2 (ajustado para g.l)	0,82
Error estándar del estadístico	0,69
Error absoluto medio	0,54
Estadístico Durbin Watson	1,79 ($p = 0,2$)
Observaciones	20

Tabla 6.5: Análisis del modelo de regresión**Fuente:** Escuela agrícola de San Felipe.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-valor
Constante	37,1	17,7	2,1	0,05
T °C del Aire	-0,7	0,9	-0,8	0,41
T °C Rocío	1,8	1,0	1,8	0,08
Humedad Relativa (%)	-0,3	0,2	-1,8	0,08

Tabla 6.6: Resumen estadístico de la regresión**Fuente:** Escuela agrícola de San Felipe.

El *coeficiente de correlación múltiple* obtuvo un valor de 0,85; el cual indica una relación fuerte y positiva entre las variables, por lo cual, se puede considerar que cuando X aumenta, Y también tiende a aumentar.

El *coeficiente de correlación múltiple al cuadrado corregido* obtuvo un valor de 0,82, el cual es una forma de *minimizar* la suma de todas las correlaciones que mantienen la serie de variables predictoras con el criterio; es decir, una forma de aminorar lo sobreestimado que puede resultar dicho coeficiente (Velarde, 2014).

El *error estándar del estimado*, el cual permitió brindar límites de predicción para nuevas observaciones es igual a 0,69.

Para determinar si el modelo puede seguir simplificándose, se consideró a aquella *variable independiente* que contenga el *p-valor* más alto y que a la vez, sea $\geq 0,05$; ver Tabla 6.5.

Finalmente, efectuada la observación del *p-valor*, se verificó que al utilizar el *método de mínimos cuadrados*, no existe la posibilidad de continuar la simplificación de la ecuación debido a que las tres *variables independientes* son mayores a 0,05.

6.4.1. Depuración del modelo

Cuando se estima un modelo de regresión múltiple con un número determinado de variables predictoras (X_i), uno de los procedimientos aplicados para estimar la ecuación de regresión múltiple correspondiente es el de introducir por igual y simultáneamente todos los predictores deseados en dicho modelo.

Sin embargo, existen otros métodos más sofisticados, entre los cuales se consideró el denominado *estimación por pasos* en su modalidad *backward*, el cual es un procedimiento de selección de variables en la ecuación y que después se van excluyendo una tras otra variable independiente. La variable que tenga la menor correlación parcial con la variable dependiente (Y), será la primera en ser considerada para su exclusión (Velarde, 2014).

Realizado este procedimiento en la regresión lineal múltiple se obtuvo lo siguiente, ver Tabla 6.7.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,84
R^2 (ajustado para g.l)	0,82
Error estándar del estadístico	0,69
Error absoluto medio	0,54
Estadístico Durbin Watson	1,7 (p = 0,2)
Observaciones	20

Tabla 6.7: Análisis del modelo de regresión, al utilizar el método paso-paso-atrás

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El *cuadrado del coeficiente de correlación múltiple* representa la proporción de la variabilidad de (Y) explicada por el conjunto de las (X_i), es decir; el componente explicativo, conocido o determinista del modelo.

El valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es $0,84$. Si bien, este valor es menor en relación al obtenido cuando existían más variables predictoras, este ajuste cumple con los requisitos de una regresión lineal múltiple antes descritos y considerar el éxito de un modelo de regresión lineal tan solo al comparar el valor de R^2 , resulta un error bastante común.

El *coeficiente de correlación múltiple al cuadrado corregido* es 82% , el cual, es el más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes.

El *error estándar del estimado*, cuyo valor permite brindar límites de predicción para nuevas observaciones es igual a $0,69$.

La ecuación que representa la regresión está dada por la información extraída en la Tabla 6.8.

$$Y_i = 22,5 + 1,0 * \beta_1 - 0,2 * \beta_2 \quad (6.8)$$

donde β_1 es la temperatura del rocío en $^{\circ}C$ y β_2 es la humedad relativa expresada en $\%$.

La Tabla 6.8, muestra los intervalos de confianza al 95% para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran con *que* precisión pueden estimarse los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles y el nivel de ruido que está presente en el mismo.

Coeficientes							
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P - valor	L-inferior	L-superior	
Constante	22,5	1,7	13,0	0,0	18,8	26,1	
T °C Rocío	1,0	0,1	8,1	0,0	0,7	1,2	
Humedad R (%)	-0,2	0,02	-9,3	0,0	-0,2	-0,1	

Anova					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P - valor
Modelo	2	41,9	20,9	44,4	0,0
Residuos	17	8,0	0,6		
Total	19	49,9			

Tabla 6.8: Resultados de Coeficientes y Prueba de Anova

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Puesto que el *p-valor* en la tabla ANOVA es $< 0,05$; existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%. Además, indica que la probabilidad de que el conjunto de variables predictoras introducidas no sea suficiente para aportar explicación de los valores predichos de (*Y*) es nula, es decir, las variaciones en la variable *temperatura superficial* se explican significativamente por el conjunto de efectos predictivos identificados.

La secuencia del modelo de regresión lineal múltiple mediante el método *paso paso-atrás* fue el siguiente, ver Tabla 6.9.

Regresión por pasos	
Método	Selección hacia atrás
Alpha a introducir	0,05
Alpha a cambiar	0,05

Paso 0	
3 variables en el modelo	14 gl para el error
R-cuadrado = 84,61 %	R-cuadrado ajustado = 81,73 %
CME = 0,48	

Paso 1	
Cambiando variable T° C del Aire con Alpha a cambiar	0,48
2 variables en el modelo	17 gl para el error
R-cuadrado = 83,94 %	R-cuadrado ajustado = 82,05 %
CME = 0,47	

Tabla 6.9: Resumen de la regresión lineal múltiple al utilizar el método *paso paso-atrás*

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

Finalmente, la ventaja de utilizar el método *paso paso-atrás*, es que otorgó de forma inmediata la *significación* de cada variable predictora dentro de la ecuación (*tiene o no relevancia dentro del modelo*).

En la tabla Tabla 6.10, el primer ajuste correspondió a las temperaturas superficiales calibradas tras considerar todas las variables predictoras (X_i), mediante el método de mínimos cuadrados.

El segundo ajuste, correspondió a las temperaturas superficiales calibradas solo al considerar algunas variables predictoras (X_i), mediante el método *paso paso-atrás*.

Día	1	2	3	4	5	6	9	11	12	13	15	17	18	23	25	26	27	29	30	31
T °C Superficie	7,0	8,1	6,9	8,1	9,6	6,8	5,6	5,0	9,3	7,7	7,3	5,8	5,0	5,1	4,5	5,6	5,3	5,2	4,4	4,2
T °C Superficie calibrada 1	6,7	7,5	7,3	7,0	8,9	5,9	6,3	5,8	9,7	7,7	6,7	6,1	5,6	6,1	3,9	6,0	4,8	5,8	5,0	4,5
T °C Superficie calibrada 2	6,6	7,3	7,1	6,8	9,1	5,7	5,9	5,8	10,1	7,7	7,0	5,9	5,5	6,1	4,2	6,0	4,7	5,9	4,7	4,4

Tabla 6.10: Temperaturas de Superficie Calibradas a partir de distintos métodos de regresión lineal múltiple

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El siguiente gráfico muestra las Temperaturas de Superficie *Calibradas* mediante regresión lineal múltiple tras utilizar ambos métodos para el mes de mayo del año 2011, ver Figura 6.1.

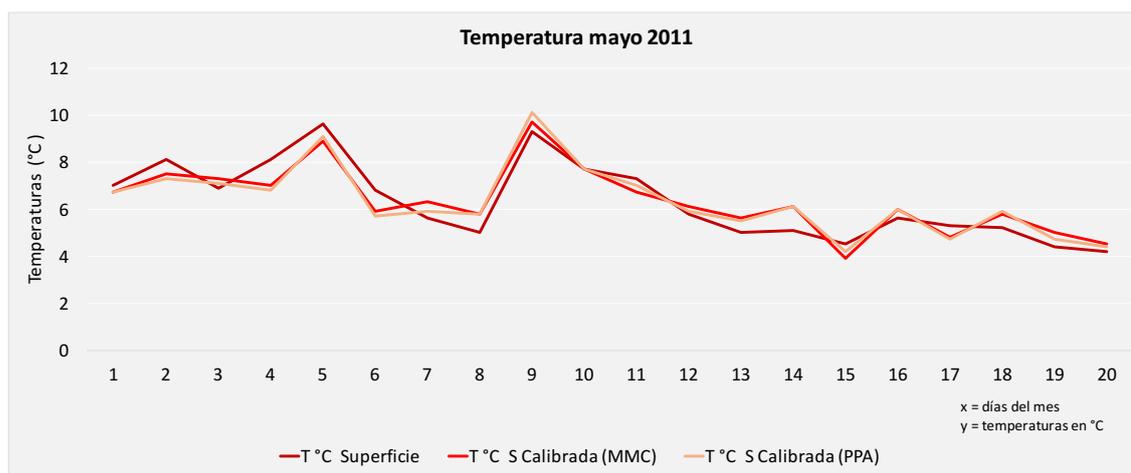


Figura 6.1: Comparación entre las Temperaturas de Superficie obtenidas a través de distintos métodos de regresiones lineales múltiples

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

El mismo método de regresión lineal múltiple (*paso paso-atrás*), fue utilizado para la estación meteorológica de la comuna de Los Andes para el mes de mayo del año 2011, ver Tabla 6.11.

Día	1	2	3	4	6	9	10	12	13	15	16	17	18	23	25	26	27	29	31
T °C Superficie	4,1	4,6	4,5	4,5	4,5	3,5	4,6	3,9	5,6	5,0	3,3	4,6	4,0	3,3	1,5	3,2	2,4	2,9	1,4
T °C del Aire	5,2	5,7	5,5	5,0	5,5	3,1	5,0	4,7	7,0	4,9	3,7	3,8	4,5	4,3	1,5	1,7	2,5	2,3	0,7
T °C Rocío	3,2	1,8	-0,4	3,0	5,5	1,1	5,0	2,7	1,0	3,2	1,7	2,8	3,5	-2,0	-1,4	-2,3	-3,3	-2,5	-3,6
Humedad R (%)	87	76	66	87	100	87	100	87	76	76	87	93	93	64	81	75	66	71	73

Tabla 6.11: Los datos corresponden a la estación meteorológica de la comuna de Los Andes

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

La aplicación y resultados de otras pruebas estadísticas se resumen a continuación, ver Tabla 6.12.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,84
R^2 (ajustado para g.l)	0,82
Error estándar del estadístico	0,50
Error absoluto medio	0,40
Estadístico Durbin Watson	2,7 (p = 0,9)
Observaciones	19
Intervalo de Confianza 95 %	0,58 - 0,92

Tabla 6.12: Análisis del modelo de regresión, al utilizar el método paso paso-atrás

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

El *cuadrado del coeficiente de correlación múltiple* representa la proporción de la variabilidad de (Y) explicada por el conjunto de las (X_i), es decir; el componente explicativo, conocido o determinista del modelo.

El valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es $0,84$. Si bien, este valor es menor en relación al obtenido cuando existían más variables predictoras, este ajuste cumple con los requisitos de una regresión lineal múltiple.

El *coeficiente de correlación múltiple al cuadrado corregido* es 82% , el cual es el más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes.

El *error estándar del estimado*, el cual nos puede permitir brindar límites de predicción para nuevas observaciones es igual a $0,5$.

La Tabla 6.12, muestra los intervalos de confianza al 95% para los coeficientes en el modelo.

Los intervalos de confianza muestran con *que* precisión pueden estimarse los coeficientes dado la cantidad de datos disponibles y el nivel de ruido que está presente en el mismo.

La ecuación que representa la regresión está dada por la información extraída en la Tabla 6.13.

$$Y_i = 11,2 + 0,6 * \beta_1 - 0,1 * \beta_2 \quad (6.9)$$

donde β_1 es la temperatura del rocío en °C y β_2 es la *humedad relativa expresada en %*.

Puesto que el p -valor en la tabla ANOVA es $< 0,05$; existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95 %. Además, indica que la probabilidad de que el conjunto de variables predictoras introducidas no sea suficiente para aportar explicación de los valores predichos de (Y) es nula. Es decir, las variaciones en la variable *temperatura superficial* se explican significativamente por el conjunto de efectos predictivos identificados, ver Tabla 6.13.

Coeficientes							
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P - valor	L-inferior	L-superior	
Constante	11,2	1,4	7,7	0,0	8,1	14,2	
T °C Rocío	0,6	0,1	8,6	0,0	0,5	0,8	
Humedad R (%)	-0,1	0,0	-5,3	0,0	-0,13	-0,05	

Anova						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P - valor	
Modelo	2	19,3	9,6	42,2		0,0
Residuos	15	3,7	0,2			
Total	17	23,0				

Tabla 6.13: Resultados de Coeficientes y Pruebas de Anova

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

Posteriormente, al utilizar los coeficientes obtenidos de la regresión lineal múltiple se procedió a ajustar las *temperaturas de superficie*, obteniendo las siguientes *temperaturas calibradas*, ver Tabla 6.14 y Figura 6.2.

Día	1	2	3	4	6	9	10	12	13	15	16	17	18	23	25	26	27	29	31
T °C Superficie	4,1	4,6	4,5	4,5	4,5	3,5	4,6	3,9	5,6	5,0	3,3	4,6	4,0	3,3	1,5	3,2	2,4	2,9	1,4
T °C Superficie calibrada	4,6	4,8	4,4	4,5	4,7	3,3	4,4	4,3	5,6	4,3	3,7	3,7	4,1	3,6	2,3	2,3	2,6	2,6	1,7

Tabla 6.14: Comparación entre Temperatura de Superficie y Temperatura de Superficie Calibrada mediante regresión lineal múltiple.

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

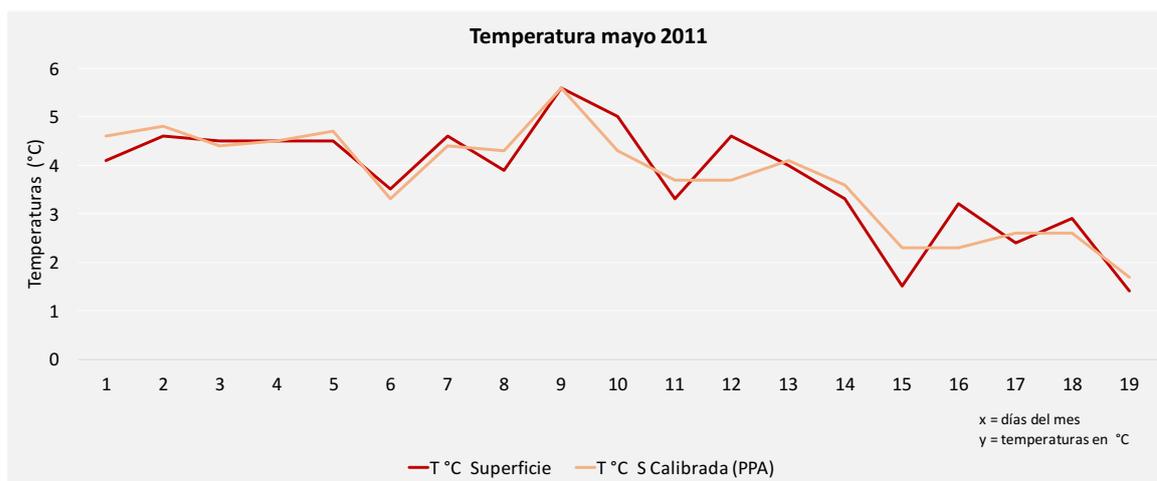


Figura 6.2: Gráfico de Temperatura Superficie v/s Temperatura de Superficie Calibrada

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de Los Andes.

6.4 INTEGRANDO LAS NUEVAS VARIABLES

Los siguientes datos fueron obtenidos desde la estación meteorológica de la comuna de La Cruz para el mes de mayo del año 2011. El método de regresión lineal múltiple a utilizar fue (*paso paso-atrás*), ver Tabla 6.15.

Días	1	3	4	5	9	12	18	23	26	27	29	30
T °C Superficie	8,7	5,8	5,1	7,6	5,7	5,0	8,0	4,1	3,7	6,9	5,1	5,3
T °C del Aire	7,4	3,2	3,1	3,3	4,0	2,0	6,4	2,7	0,7	2,0	2,2	3,0
T °C Rocio	5,2	2,5	2,8	2,6	3,6	1,6	5,8	1,7	-0,2	1,4	1,2	2,0
Humedad R (%)	86	95	98	95	97	97	96	93	94	96	93	93

Tabla 6.15: Los datos corresponden a la estación meteorológica de la comuna de La Cruz

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

La aplicación y resultados de otras pruebas estadísticas fueron los siguientes, ver Tabla 6.16 y Tabla 6.17.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,64
R^2 (ajustado para g.l)	0,6
Error estándar del estadístico	1,0
Error absoluto medio	0,6
Estadístico Durbin Watson	2,5 (p = 0,8)
Observaciones	12
Intervalo de Confianza 95 %	0,58 - 0,92

Tabla 6.16: Análisis del modelo de regresión al utilizar el método paso paso-atrás

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

Coeficientes							
Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P - valor	L-inferior	L-superior	
Constante	3,7		0,6	6,2	0,0	2,4	5,0
T °C del Aire	0,7		0,2	4,2	0,0	0,3	1,0

Anova					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	P - valor
Modelo	1	17,1	17,1	17,7	0,00
Residuos	10	9,6	1,0		
Total	11	26,7			

Tabla 6.17: Resultados de Coeficientes y Pruebas de Anova

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz

El valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es 0,64.

El coeficiente de correlación múltiple al cuadrado corregido es 60%, siendo este el valor más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes.

El *error estándar del estimado*, valor que permite brindar límites de predicción para nuevas observaciones es igual a 1,0.

La ecuación que representa la regresión está dada por la información extraída en la Tabla 6.17.

$$Y_i = 3,7 + 0,7 * \beta_1 \quad (6.10)$$

donde β_1 es la temperatura del aire en °C.

La tabla anterior de *coeficientes* entregó los intervalos de confianza al 95 % para los coeficientes en el modelo, ver Tabla 6.17.

Puesto que el *p-valor* en la tabla ANOVA es $< 0,05$; existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95 %, lo que indica que la probabilidad de que el conjunto de variables predictoras introducidas no sea suficiente para aportar explicación de los valores predichos de (Y) es nula. Es decir, las variaciones en la variable TS se explican significativamente por el conjunto de efectos predictivos identificados.

Al utilizar los coeficientes obtenidos de la regresión lineal múltiple se procedió a ajustar las temperaturas de satélite, obteniendo las siguientes temperaturas corregidas, ver Tabla 6.18 y Figura 6.3.

Día	1	3	4	5	9	12	18	23	26	27	29	30
T °C Superficie	8,7	5,8	5,1	7,6	5,7	5,0	8,0	4,1	3,7	6,9	5,1	5,3
T °C Superficie calibrada	8,6	5,8	5,8	5,9	6,4	5,0	8,0	5,5	4,2	5,0	5,2	5,7

Tabla 6.18: Comparación entre Temperatura de Superficie y Temperatura de Superficie Calibrada mediante regresión lineal múltiple

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

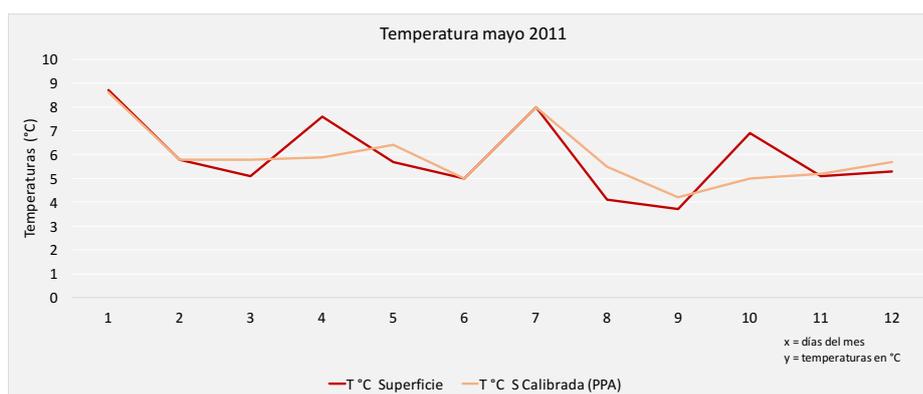


Figura 6.3: Gráfico de Temperatura de Superficie v/s Temperatura de Superficie Calibrada

Fuente: Estación meteorológica de la comuna de La Cruz.

6.4 INTEGRANDO LAS NUEVAS VARIABLES

Con la finalidad de entregar una mayor validación a la *ocurrencia de heladas* en la estación meteorológica de la Escuela agrícola de San Felipe y la estación meteorológica de la comuna de La Cruz, fueron considerados algunos factores de carácter local para un par de meses en el año 2015, entre los que se consideraron la *latitud, la longitud, la altitud, la pendiente en porcentaje, la exposición solar y la distancia al mar* como variables *predictoras*. Los valores de la pendiente en porcentaje, la exposición solar y la distancia al mar, fueron extraídos del *AsterGDEM V2*.

Para identificar correlaciones, ajustes, probabilidades de ocurrencias, entre otros; se utilizó el software estadístico *GeoDa, propiedad de la Universidad de Chicago*.

Es importante señalar que los valores insertados *fueron normalizados (valores entre 0 y 1)*, dado que sus unidades de representación eran muy dispares y al momento de expresar resultados entregaban valores poco comprensibles.

Los valores de las estaciones utilizados sometidos a validación y ajuste fueron facilitados por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). La distribución de las estaciones meteorológicas dentro de la región de Valparaíso es la siguiente, ver Figura 6.4.



Figura 6.4: Distribución de estaciones meteorológicas, región de Valparaíso

Fuente: Proyecto Ciren, imagen gentileza de Google Earth.

Los valores de ocurrencia de heladas mensuales ajustados obtenidos al utilizar el método de regresión lineal múltiple fueron los identificados en la columna denominada *ProbAjustada*, ver Tabla 6.19 y Tabla 6.21.

Sin embargo, para este estudio, las estaciones relevantes pertenecen a la Escuela agrícola de San Felipe y la comuna de La Cruz.

Id	Estación	Lat	Long	Mayo	Altitud	PenGrad	ExpoSol	DistMar	ProbAjustada
1	Chincolco Liceo Agrícola	-32,22	-70,83	0,09	669,94	0,65	253,71	55,43	0,07
2	Hacienda Alicahue	-32,35	-70,78	0,00	655,79	7,53	270,00	57,32	0,01
3	Cabildo	-32,43	-70,95	0,00	311,87	1,77	230,66	42,48	0,03
4	San Felipe Escuela Agrícola	-32,76	-70,71	0,09	675,13	4,34	61,03	68,69	0,08
5	La Cruz	-32,82	-71,23	0,00	179,13	1,94	338,12	24,98	0,00
6	Calle Larga Agro	-32,87	-70,65	0,09	775,05	1,61	147,47	77,58	0,09
7	Quillota	-32,88	-71,25	0,00	133,13	1,15	329,91	22,22	0,00
8	Los Aromos	-32,95	-71,40	0,00	76,62	3,18	188,59	10,32	0,00
9	Jardín Botánico	-33,04	-71,50	0,00	76,37	7,14	135,21	4,92	0,00
10	Olmué Pelumpen	-33,02	-71,19	0,00	153,26	2,89	357,99	31,49	0,00
11	Embalse Lliu Lliu	-33,10	-71,21	0,00	256,07	2,88	320,89	33,07	0,00
12	Lago Peñuelas	-33,15	-71,55	0,00	344,88	8,71	198,10	10,78	0,02
13	Casablanca	-33,32	-71,41	0,08	269,00	0,62	91,06	20,87	0,07
14	Santo Domingo Aeródromo	-33,66	-71,61	0,00	76,87	1,25	150,86	0,00	0,00
15	Rodelillo Aeródromo	-33,07	-71,56	0,00	98,16	16,97	37,61	4,40	0,00

Tabla 6.19: Resultados al aplicar una regresión lineal múltiple a través del software GeoDa, mayo 2015

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

La ecuación ajustada de la *regresión lineal múltiple*, se construyó a partir de los coeficientes resultantes obtenidos tras la selección de solo algunas variables predictoras al utilizar el método de *mínimos cuadrados*, ver Tabla 6.20.

$$Y_i = 0,39 + 1,1 * \beta_1 - 4,0 * \beta_2 - 1,0 * \beta_3 - 0,9 * \beta_4 + 4,4 * \beta_5 \quad (6.11)$$

donde β_1 es la latitud, β_2 es la longitud, β_3 es la pendiente en grados, β_4 es la exposición solar y β_5 es la distancia al mar.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-valor
Constante	0,4	10,16	2,4	0,04
Latitud	1,1	,5	2,3	0,04
Longitud	-4,0	1,4	-2,9	0,01
PenGrad	-1,0	0,3	-3,9	0,00
Exposol	-0,9	0,2	-4,6	0,00
DistMar	4,4	1,3	3,5	0,00

Tabla 6.20: Resumen estadístico de la regresión

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

Efectuada la observación del *p-valor*, se verificó que no existe la posibilidad de continuar la simplificación de la ecuación, debido a que las *variables independientes* son *menores* a 0,05.

La Tabla 6.21, muestra los valores para el mes de junio del 2015.

Id	Estación	Lat	Long	Mayo	Junio	Altitud	PenGrad	ExpoSol	DistMar	ProbAjustada
1	Chincolco Liceo Agrícola	-32,22	-70,83	0,09	0,14	669,94	0,65	253,71	55,43	0,15
2	Hacienda Alicahue	-32,35	-70,78	0,00	0,03	655,79	7,53	270,00	57,32	0,06
3	Cabildo	-32,43	-70,95	0,00	0,03	311,87	1,77	230,66	42,48	0,02
4	San Felipe Escuela Agrícola	-32,76	-70,71	0,08	0,15	675,13	4,34	61,03	68,69	0,20
5	La Cruz	-32,82	-71,23	0,00	0,00	179,13	1,94	338,12	24,98	0,02
6	Quintero Aeródromo	-32,79	-71,52	0,00	0,00	9,14	2,12	16,54	0,00	0,02
7	Calle Larga Agro	-32,87	-70,65	0,09	0,15	775,05	1,61	147,47	77,58	0,20
8	Quillota	-32,88	-71,25	0,00	0,02	133,13	1,15	329,91	22,22	0,01
9	Los Aromos	-32,95	-71,40	0,00	0,02	76,62	3,18	188,59	10,32	0,03
10	Embalse Lliu Lliu	-33,10	-71,21	0,00	0,00	256,07	2,88	320,89	33,07	0,03
11	Lago Peñuelas	-33,15	-71,55	0,00	0,00	344,88	8,71	198,10	10,78	0,06
12	Casablanca	-33,32	-71,41	0,08	0,08	269,00	0,62	91,06	20,87	0,13
13	Santo Domingo Aeródromo	-33,66	-71,61	0,00	0,00	76,87	1,25	150,86	0,00	0,02
14	Rodelillo Aeródromo	-33,07	-71,56	0,00	0,00	98,16	16,97	37,61	4,40	0,00

Tabla 6.21: Resultados al aplicar una regresión lineal múltiple a través del software GeoDa, junio 2015.

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

La ecuación ajustada de la *regresión lineal múltiple*, se construyó al considerar los coeficientes resultantes obtenidos tras la selección de solo algunas variables predictoras, la cual utilizó el método de *mínimos cuadrados*, ver Tabla 6.22.

$$Y_i = 0,2 + 1,0 * \beta_1 - 1,1 * \beta_2 - 0,4 * \beta_3 \quad (6.12)$$

donde β_1 es altitud, β_2 es la pendiente en grados y β_3 es la exposición solar.

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-valor
Constante	0,2	0,1	2,3	0,04
Altitud	1,0	0,12	8,6	0,0
PenGrad	-1,1	0,3	-4,2	0,00
ExpoSol	-0,4	0,12	-2,9	0,02

Tabla 6.22: Resumen estadístico de la regresión

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

Para evaluar las *bondades* del modelo propuesto, se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos, ver Tabla 6.23.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de determinación R^2	0,91
R^2 (ajustado para g.l)	0,88
Error estándar del estadístico	0,15
Error absoluto medio	0,1
Estadístico Durbin Watson	1,9 (p = 0,5)
Observaciones	14

Tabla 6.23: Análisis del modelo de regresión

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

Posteriormente, efectuada la observación del *p-valor*, se verificó que al utilizar el *método de mínimos cuadrados*, no existe la posibilidad de continuar la simplificación de la ecuación debido a que las *variables independientes* son menores a 0,05.

El número de ocurrencias de heladas obtenidos una vez realizadas las regresiones lineales múltiples fue el siguiente, ver Tabla 6.24 y Tabla 6.25.

Estación meteorológica	mayo	junio
San Felipe	2,5	6,0
La Cruz	0,0	1,0

Tabla 6.24: Número de ocurrencia de helada

Fuente: Estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso.

Obtenidos los valores de ocurrencia de heladas, se observó que al comparar con los valores ajustados del capítulo anterior, el mes de junio es bastante exacto. Así mismo, existió una diferencia de *dos* eventos para el mes de mayo.

Mes	N° heladas			Mes	Probabilidades		
	$T^{\circ}C$ del aire	$T^{\circ}C$ superficie	$T^{\circ}C$ s corregida		$T^{\circ}C$ del aire	$T^{\circ}C$ superficie	$T^{\circ}C$ s corregida
mayo	0	0	2	mayo	0	0	0,13
junio	7	4	6	junio	0,23	0,13	0,20
julio	0	0	0	julio	0	0	0
agosto	0	0	0	agosto	0	0	0
septiembre	0	0	0	septiembre	0	0	0
octubre	0	0	0	octubre	0	0	0

Tabla 6.25: Resumen de número probabilidad de heladas para el año 2015

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

6.4.2. Conclusiones del Capítulo

La integración de nuevas variables predictoras *micrometeorológicas* y otras de carácter *local* en este capítulo, tuvo como finalidad el otorgar una mayor argumentación y poder explicativo al momento de realizar y querer conocer la *correlación y estimación* entre la TS y la TA. Dado, a que se introdujeron nuevos estimadores, se procedió a realizar ajustes de estas temperaturas mediante regresiones lineales múltiples, utilizando métodos distintos, los cuales no difieren significativamente en los valores expresados para R^2 ajustado. Sin embargo, el método denominado *paso paso-atrás* resultó entregar una ecuación más resumida en virtud de tiempo de procesamiento, ya que de forma más rápida eliminó a aquellas variables predictoras con menor poder significativas para el modelo en si al considerar el *p-valor*.

Terminado este proceso, se compararon los valores de calibración de las temperaturas obtenidas al utilizar ambas metodologías de regresión lineal múltiple con las temperaturas obtenidas en el capítulo anterior (*regresión lineal simple*), con la intención de determinar si existió algún aporte significativo de estas últimas variables introducidas al modelo ajustado. Ya con estos valores comparativos obtenidos, se puede argumentar tras lo obtenido que en términos de R^2 ajustado, existe una mayor tendencia de poder explicativo de la variable TS al introducir nuevas variables *independientes*, lo cual, es correspondido con aquello que cita que *al introducir en el modelo una nueva variable regresora, el nivel explicativo será mayor que hacerlo solo con una variable, o en todo caso, no disminuirá, dado que la primera variable continúa como explicativa*.

La identificación de algunos patrones sobre los rangos de valores en los cuales se enmarcaban ciertas variables explicativas, condujeron a minimizar aún más el modelo, debido a esto, es que los modelos resultantes dependen siempre de la calidad y el tipo de dato disponible, de lo contrario, los resultados pueden no ser consistentes. No obstante, cada vez que se pretende realizar un modelo, las variables explicativas deben ser analizadas una por una, dada la particularidad especial de cada sector geográfico (*estación meteorológica*). Adicionalmente, se buscó mediante la incorporación de variables locales, el conocer el grado de significancia que tenía cada una de estas variables, con la finalidad de comparar e incluir posibles variables predictoras que aporten positivamente al modelo.

CAPÍTULO 7

PREDICCIÓN A FUTURO

La predicción meteorológica tiene un carácter especializado para servir a un importante sector de la economía nacional. La creación de este servicio es necesaria ya que las operaciones agrícolas de hoy en día dependen cada vez más de la predicción detallada y precisa de los elementos meteorológicos. La información meteorológica es importante para la adopción de numerosas operaciones operativas y los agrónomos, los agricultores y los campesinos, necesitan de esta información tanto para sus decisiones estratégicas o a largo plazo, como para las que tienen un carácter táctico de aplicación más inmediata. La información en que se fundan las decisiones estratégicas, con los conocimientos que actualmente se poseen, se limita a la información climatológica en forma de distribuciones de probabilidad. Esto permite al agricultor tomar decisiones a largo plazo (*elección de cultivos, equipos necesarios, mercados a exportar, entre otros*). Una vez adoptadas, estas decisiones son irrevocables para la estación del año de que se trate (Maunder, 1970).

De los principales elementos del clima que intervienen directa e indirectamente en los modelos climáticos destacan la *precipitación, la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar, la insolación entre otros*, los que pueden definir además, en ciertas circunstancias algún tipo de distrito agroclimático.

7.1. El origen de los modelos climáticos

Los primeros modelos de circulación de la atmósfera fueron dirigidos por el profesor estadounidense Joseph Smagorisky, director del Laboratorio de Dinámica de Fluidos Geofísicos (GFDL), en 1953. Para ello, se utilizó el primer gran ordenador de la historia, el Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), construido en 1950. Los primeros resultados de un modelo acoplado océano-atmósfera, en el que se han basado todos los posteriores modelos, se publicaron en 1969 y se deben a Syukuro Manabe y Kirk Bryan, miembros del grupo creado por Smagorinsky.

Sin embargo, es Vilhelm Bjernes, un físico noruego quién en el año 1904 publicó el artículo “*El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la mecánica y la física*”, en donde por medio de la aplicación de la dinámica de fluidos y la termodinámica expresó la evolución en el tiempo de una situación meteorológica inicial y, por tanto, abrió la posibilidad de la realización de predicciones mediante el uso de las leyes físicas, siendo el punto de partida de las predicciones meteorológicas mediante modelos numéricos (Santos-Muñoz *et al.*, 2005).

El aumento de la calidad y precisión de las predicciones meteorológicas va de la mano con el incremento de la capacidad de cálculo mediante grandes supercomputadoras, la *no linealidad y el caos determinista* es la característica principal de los procesos atmosféricos; es por ello, que el uso de modelos numéricos de predicción del tiempo se hace imprescindible.

Es factible manifestar que la capacidad para *pronosticar el clima* ha mejorado en años recientes, y en muchos lugares del mundo ha habido un mayor número de esfuerzos significativos dedicados a aplicar la información climática para mejorar los sistemas agrícolas (Jagtap *et al.*, 2002).

La resolución espacio - temporal de estos modelos se ha incrementado gracias a la potencia de cálculo. Actualmente, existen modelos operativos con una resolución espacial de 2,5 km y temporalidad diaria con periodos de análisis de hasta 100 años.

En el caso de modelos de investigación, donde los requerimientos de disponibilidad no son tan exigentes, se llega a resoluciones espaciales de 500 m y resoluciones temporales de diez minutos. Es importante señalar que sus resultados dependen de la calidad de los datos disponibles y de las variables incluidas, por tanto, los modelos climáticos permiten simular matemáticamente uno o varios elementos del clima de un territorio en un intervalo de tiempo pasado, presente o futuro.

Los modelos numéricos y sus implementaciones en programas de cómputo, tienden a ser similares en cuanto al tipo de procesamiento (*integración o derivación parcial de los métodos numéricos*) y en cuanto a las dependencias de datos que deben ser tenidas en cuenta para resolver el problema (Tinetti *et al.*, 2008).

7.1.1. Modelos de Predicción

Los recientes modelos numéricos de predicción del tiempo permiten obtener un conjunto de variables meteorológicas pronosticadas con anticipación desde horas hasta meses y de manera operativa, convirtiéndose estos en el primer eslabón para un sistema de alerta temprana (Lighezzolo *et al.*, 2016).

Tradicionalmente, la problemática de la *predicción del tiempo* a corto plazo y la *predicción climática* eran abordadas por separado, como disciplinas diferentes. En la primera, es clave la correcta definición de las condiciones iniciales y la simulación en altas resoluciones, mientras que en la segunda, el interés máximo se centra en la incorporación del mayor número de componentes del sistema terrestre y la simulación de las complejas relaciones entre ellos, para de esta forma, capturar correctamente sus variaciones, retroalimentaciones y evolución a largo plazo (Parodi *et al.*, 2016).

Ya no se habla de un umbral de predicción determinista puro, porque hay que usar técnicas estadísticas incluso para la predicción de corto alcance. Los errores en la determinación de la condición inicial son apreciables, los cuales crecen exponencialmente. El carácter determinista del problema se manifiesta en que la condición inicial puede ser preparada (Danforth y Kalnay, 2008).

Se puede distribuir la intensidad del error en los puntos de mayor crecimiento, es decir, los errores iniciales estarán localizados, más cuanto mayor sea “el grado de caos” presente en el sistema, tendremos, pues, que acostumbrarnos a interpretar pronósticos probabilísticos, que serán en escenarios locales para el corto plazo (*de 24 a 72 horas*), mediano plazo (*de 72 horas a 7 días*), medianamente largo plazo (*de 7 días a 1 mes*) y largo plazo (desde un mes hasta un año) (PiuZZi, 2007).

Efectivamente, hoy día no existe un buen modelo estocástico de la evolución atmosférica y además, no parece que vaya a existir en un plazo corto. La tendencia es usar la llamada predicción por conjuntos, denominado (*Ensemble Prediction Systems*), que consiste en usar conjuntos de condiciones iniciales distintas y/o distintos modelos deterministas (Rodríguez, 2008).

Los modelos numéricos de predicción del tiempo son abstracciones de representaciones del mundo real aplicadas al tratamiento predictivo, que discretizan áreas o cuerpos en dos o tres dimensiones respectivamente, las que aplican funciones aproximadas del comportamiento de las propiedades que se quieren estudiar y juegan un papel clave en el proceso de la predicción del tiempo. Actualmente, no se concibe que se realicen predicciones del tiempo sin la ayuda de alguno de los múltiples modelos numéricos que existen.

En meteorología, según las escalas espaciales a las que se aplican estos sistemas, los modelos meteorológicos se pueden dividir en, ver Tabla 7.1.

	<i>Extensión Hz</i>	<i>Tiempo Característico</i>	<i>Fenómenos</i>
Macro	10000 km	10 días	Vientos dominantes
Sinóptica	1000 km	1 día	Ciclón extratropical
Meso	10 km	1 hora	Tormentas
Micro	<1 km	<10 min	Tornados

Tabla 7.1: Escalas espacio - temporales horizontales en el estudio de la atmósfera

Fuente: Atmospheric thermodynamics.

Según la técnica de elaboración, este podrá ser un *pronóstico subjetivo* o un *pronóstico objetivo*.

El primero, depende de la capacidad del pronosticador, quién analiza las condiciones atmosféricas del lugar en que se encuentra y elabora un pronóstico acorde a su capacidad analítica y experiencia, ver Figura 7.1.

El *pronóstico objetivo* estará supeditado a la utilización de técnicas estándares aplicables a cualquier lugar del mundo.

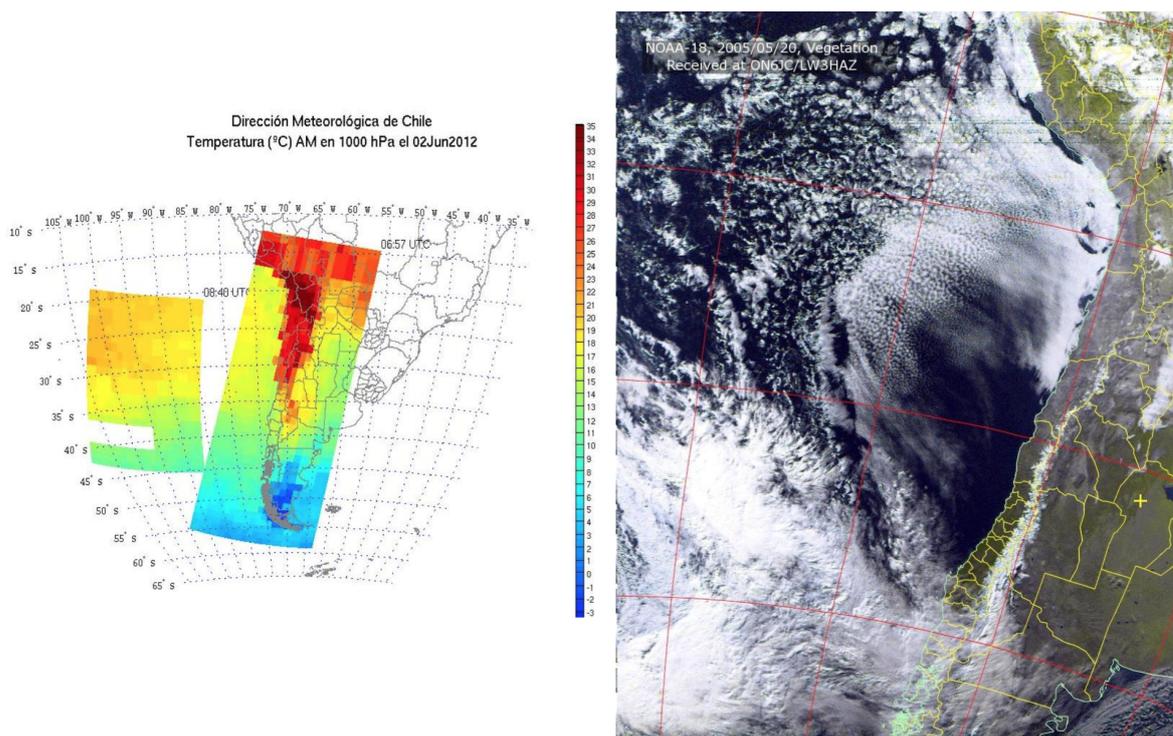


Figura 7.1: Estimación de Temperatura °C al utilizar imágenes del satélite NOAA 18, 02 junio 2012

Fuente: Satélite NOAA 18, Dirección Meteorológica de Chile.

Existen modelos numéricos de predicción meteorológica tales como el WRF, el Global Forecast System (GFS) y el Climate Forecast System (CFSv2) que permiten trabajar en escalas regionales o globales y temporales de corto, medio y largo plazo (Lighezzolo *et al.*, 2016).

En este capítulo, se utilizó el modelo WRF tal como se describió desde el principio de la propuesta.

Finalmente, la importancia del pronóstico meteorológico radica en ser considerada como una *herramienta* necesaria para la oportuna toma de decisiones respecto al eventual impacto de las condiciones atmosféricas pronosticadas en función del bienestar humano y de su medio ambiente. Es por esto, que es de vital importancia el recibir los pronósticos en forma regular (Piuzzi, 2007).

7.1.1.1. Evaluación de modelos climáticos

La evaluación del comportamiento de los modelos climáticos en periodos instrumentales permite progresar en la acotación de las *incertidumbres* de las proyecciones de clima futuro que se obtienen con ellos. Por ello, que *los modelos climáticos* son herramientas esenciales para el estudio, el avance en la comprensión y predicción de la variabilidad climática, en el cambio climático natural y de origen antropogénico. No obstante, al ser representaciones simplificadas de los procesos físico-químicos que rigen la evolución del sistema climático, sus resultados están sujetos a errores sistemáticos que en muchos casos, son de magnitud similar a los cambios que se producen en el clima y que se quieren simular.

Su evaluación en los periodos de referencia en los que se dispone de observaciones instrumentales resulta prioritaria para comprender y corregir sus deficiencias. Los resultados de la evaluación de los distintos modelos son también fundamentales en una aproximación probabilística de la predicción de clima futuro, en la que se utiliza un *ensemble* o conjunto de diferentes predicciones climáticas para abordar las incertidumbres de diferente naturaleza asociadas a las mismas.

El objetivo que se persigue, es utilizar la información obtenida en la evaluación para ponderar y combinar los diferentes miembros en una predicción por conjuntos. Hoy en día, la simulación más efectuada corresponde a aquellas variables climáticas derivadas en la *temperatura en superficie* y *precipitaciones*.

7.1.1.2. La meteorología a nivel local

En Chile, las variaciones de clima, relieve, suelo y de cercanía al mar, determinan la gran diversidad de la actividad agrícola del país.

Se definió a la *Meteorología Agrícola*, como aquella que trata la acción mutua que se ejerce entre los factores meteorológicos e hidrológicos, por una parte, y la agricultura en su más amplio sentido.

Su objetivo es detectar y definir dichos efectos, para después aplicar los conocimientos que se tienen de la atmósfera a los aspectos prácticos de la agricultura.

Importancia de la meteorología agrícola

La producción agrícola todavía depende del tiempo y del clima a pesar de los espectaculares progresos que la tecnología agrícola ha realizado en los últimos decenios.

El conocimiento de los recursos ambientales disponibles y de las condiciones previstas desde las capas situadas debajo de la superficie del suelo, pasando por la capa límite suelo – aire hasta llegar a los niveles inferiores de la atmósfera, permiten establecer directrices para la toma de decisiones estratégicas en lo que se refiere a planificación a largo plazo de los sistemas agrícolas.

Pronósticos para la agricultura

Esta es una información muy necesaria, debido a que las operaciones agrícolas dependen cada vez más de una predicción detallada y precisa de los elementos meteorológicos.

Los profesionales, técnicos y agricultores requieren de información de calidad, para fundamentar sus decisiones operativas y estratégicas relacionadas con las condiciones atmosféricas.

Decisiones estratégicas y operativas

Esta consiste en información climatológica en forma de distribuciones de probabilidad, lo que permite al agricultor tomar decisiones de largo plazo (elegir el cultivo, la variedad, el equipamiento, entre otras).

Las decisiones operativas o tácticas son descritas por dos tipos; las *decisiones generales o habituales*, que afectan por ejemplo a las prácticas del cultivo y las *decisiones de alto costo*, la cual implica la puesta en marcha de los sistemas de protección de los cultivos.

Posteriormente, cualquiera sea el tipo de decisión, es necesario tener un conocimiento adecuado de los efectos que el tiempo y el clima ejercen en el suelo, en las plantas, para poder utilizar con eficacia la información meteorológica y climatológica destinada al sector silvoagropecuario.

Servicio agrometeorológico

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) con apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y la OMM ejecuta en el año 1987, el proyecto CHI 87-004, a través del cual creó e incorporó en su estructura de funcionamiento un servicio *agrometeorológico* dirigido al sector silvoagropecuario del país, con el doble propósito de *contribuir* a disminuir pérdidas potenciales generadas por fenómenos meteorológicos adversos y *optimizar* la productividad agrícola, al aprovechar al máximo las potenciales climáticas locales.

El Centro Regional de Información Agrometeorológica (CRIA), tuvo el propósito de agilizar y concentrar la recopilación de información meteorológica de la red de estaciones albergada en cada región del país y divulgar servicios de pronósticos, de alertas, de boletines a la comunidad agrícola regional.

Entre las funciones del CRIA, se encuentran el *coordinar* y *recolectar* información meteorológica diaria y transmitirla a la DMC, el *repcionar* los productos agrometeorológicos desde la DMC y difundirlos a los usuarios de la región, el *recopilar* la información mensual generada por cada estación de la red y enviarla a la DMC, el *supervisar* el funcionamiento diario de las estaciones, el *levantar* requerimientos de información de los agricultores, el *proporcionar* información pública a través de los medios de difusión masiva, tales como periódicos, radios y canales de televisión locales y *difundir* los avisos y alertas meteorológicas.

7.1.2. El modelo WRF

Los modelos numéricos de pronósticos del tiempo constituyen una herramienta base para entender, explicar y predecir el comportamiento de la atmósfera (Skamarock *et al.*, 2005).

Existen dos grandes tipos de modelos numéricos: los *hidrostáticos*, como el High Resolution Limited Area Model (HIRLAM) y *no hidrostáticos*, tales como el Mesoscale Atmospheric Simulation System (MASS), Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), PennStateNCAR (MM5) o la versión avanzada de este último denominada WRF.

Los modelos mesoescalares son aquellos que permiten estudiar y pronosticar fenómenos meteorológicos, incluyendo los mesoescalas, es decir, aquellos que ocurren a una escala espacial relativamente pequeña (Guerrero Higuera *et al.*, 2012).

Actualmente, los modelos *mesoescalares* de área limitada permiten realizar simulaciones de la atmósfera bajo condiciones no hidrostáticas y resultan muy útiles para el estudio de fenómenos de precipitaciones intensas y severas (Colle *et al.*, 1999).

Todos los modelos de simulación mesoescalares hacen uso de distintos esquemas de parametrizaciones para resolver aquellos fenómenos cuya escala espacial es inferior a la resolución del modelo (*pocos kilómetros*), entre ellos; parametrización de cúmulos, microfísica, capa límite, entre otros.

El modelo WRF ha sido desarrollado con colaboración entre la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la National Center for Atmospheric Research (NCAR) y otras organizaciones. Este modelo se caracteriza no solo por ser uno de los modelos numéricos de predicción de tiempo que más se utiliza a nivel mundial en las oficinas de pronóstico, sino también por ser muy empleado en el ámbito investigativo (Arango y Ruiz, 2011).

Los modelos numéricos de predicción del tiempo, en particular el WRF, muestran sensibilidad a las condiciones topográficas complejas, *la orografía afecta en gran medida los resultados de las simulaciones* (Colle *et al.*, 1999).

Este modelo mesoescalar se ha utilizado ampliamente para pronósticos operacionales, así como para experimentos de investigación realistas e idealizados (Olabarrieta *et al.*, 2012).

El modelo WRF incluye dos solucionadores dinámicos para obtener una simulación numérica; el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) y el The Advanced Research WRF (ARW).

El modelo WRF tiene la particularidad de poder ser configurado localmente para representar *dominios espaciales* en diferentes escalas de acuerdo al estudio que desee realizarse. Para ello, deben seleccionarse de manera adecuada tanto las bases de datos, como las condiciones iniciales y de contorno que mejor permitan describir los fenómenos deseados (Fernández *et al.*, 2011).

7.1.2.1. Generación de productos con WRF

La implementación realizada del modelo WRF comienza con la descarga de *datos globales* que cumplen la función de condiciones iniciales y de contorno. Estos son provistos por el modelo GFS con 0,5 grados de resolución horizontal.

En la etapa de preprocesamiento se definieron los dominios de simulación, se interpolaron datos terrestres al dominio de simulación y se decodificaron e interpolaron datos meteorológicos desde el modelo global al dominio de simulación. En el procesamiento, se realizó la simulación con los parámetros de ajuste seleccionados previamente.

En el postprocesamiento se realizaron mediante distintos software específicos la adaptación del archivo de salida de la simulación a algún formato útil para poder ser trabajado en un Sistema de Información Geográfico (SIG). El dominio horizontal tuvo una resolución de 15 km.

La producción del pronóstico por el modelo WRF se realizó mediante una simulación diaria inicializada con los datos de la hora 00:00 Coordinated Universal Time (UTC) del modelo GFS (Lighezzolo *et al.*, 2016).

Para este caso, la simulación se efectuó para 48 horas de pronóstico, obteniendo datos cada 60 minutos.

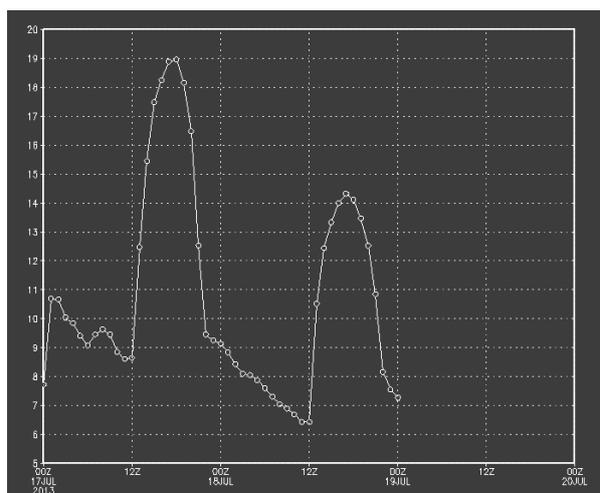


Figura 7.2: Temperaturas obtenidas a través del modelo WRF para 48 horas, 17-18 de julio 2013

Fuente: Modelo WRF, Lighezzolo.

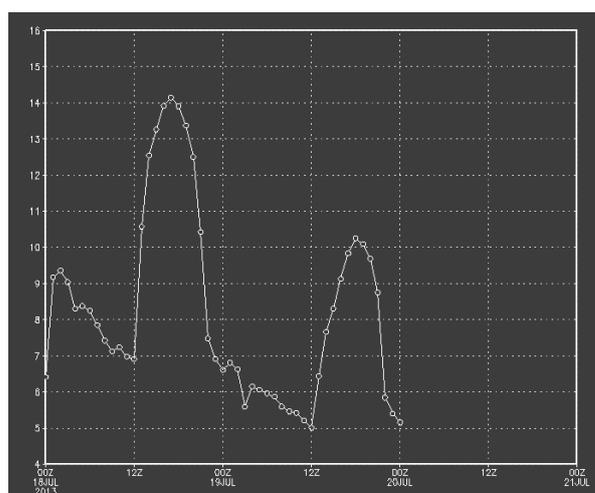


Figura 7.3: Temperaturas obtenidas a través del modelo WRF para 48 horas, 18-19 de julio 2013

Fuente: Modelo WRF, Lighezzolo.

Se considera que los resultados de la simulación de las variables pueden contener corrimientos espacio-temporales, así como también imprecisiones en los valores de las mismas (Lighezzolo *et al.*, 2016).

Dado que la simulación de las temperaturas está en horario UTC, para el caso de Chile, se debió considerar el horario UTC -03:00.

7.1 EL ORIGEN DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS

A su vez, se pretendió obtener una predicción de temperatura a 24 horas mediante la utilización de una regresión lineal múltiple, de la cual, posteriormente se desprendieron los siguientes valores estadísticos, ver Tabla 7.2 y Tabla 7.3.

T °C Hora Modis	T °C Rocío	Viento m/s	Humedad %	Presión mb	T °C menor	Cálculo T °C
					-0,9	
						Cálculo T °C
-0,4	-1,9	0,1	89,7	944,1	0,5	0,1
0,7	-1,5	0,5	85,1	942,5	5,9	1,9
5,9	4,7	0,0	92,4	939,2	2,8	1,9
2,9	2,0	0,0	93,6	938,7	4,0	1,9
4,2	3,5	0,0	95,1	934,7	4,1	3,3
4,1	3,5	0,0	95,6	941,5	2,1	1,4
2,3	1,3	0,0	93,0	937,0	-0,2	2,4
-0,1	-1,1	0,1	93,2	937,1	3,0	2,3
3,4	2,8	0,0	95,8	940,3	5,6	1,7
5,9	5,0	0,0	94,0	939,7	2,0	1,9
2,5	2,1	0,2	97,4	944,5	0,5	1,1
2,6	1,1	0,1	89,8	941,8	-0,4	1,2
0,6	-2,6	0,5	79,3	945,5	2,4	0,8
2,7	-1,8	0,5	72,8	943,6	2,9	2,2
4,5	0,6	0,7	76,1	942,0	3,3	3,4
3,7	-0,3	0,7	75,6	937,6	2,6	4,3
3,2	-0,1	0,7	79,1	939,8	1,6	3,6
2,4	-1,1	0,3	77,8	941,2	6,1	1,7
6,1	5,5	0,4	95,7	937,3	1,3	4,0
4,8	4,1	0,1	95,4	941,7	0,7	1,7
1,4	0,1	0,0	91,1	944,3	-5,0	0,1
-3,6	-4,9	0,2	91,0	945,3	-2,8	-0,1
-1,0	-5,4	0,6	72,6	944,8	0,2	1,3
0,2	-3,8	0,7	74,8	940,0	0,8	3,2
4,2	-2,3	0,5	62,9	935,9	5,7	5,7
6,3	5,5	0,5	94,7	941,1	1,6	3,3
1,9	1,3	0,4	95,6	942,7	7,9	2,1
8,5	4,7	0,4	77,3	939,0	3,9	3,7
5,7	3,2	0,8	84,2	939,3	6,0	4,2
6,4	5,9	0,0	97,0	941,4	-0,9	1,6
-0,2	-0,9	0,0	95,4	942,4		

Tabla 7.2: Estimación de temperaturas utilizando una regresión lineal múltiple predicha a 24 horas, julio 2013

Fuente: Escuela agrícola de San Felipe.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,49
Valor de significación	0,0
Coefficiente de determinación R^2	0,24
R^2 (ajustado para g.l)	0,08
Error estándar del estadístico	2,7
Observaciones	30

Tabla 7.3: Análisis del modelo de regresión**Fuente:** Escuela agrícola de San Felipe

Se logró verificar que el valor que se obtuvo para el estadístico R^2 a partir del ajuste de los datos presentados es 0,24. Este valor denota una *baja bondad del ajuste*, por lo cual, el emplear este índice dentro de esta metodología para realizar predicciones a 24 horas, pudiese no ser representativa.

En definitiva, se efectuó una comparación con datos de temperaturas simulados por el modelo WRF, además de los simulados por una regresión lineal múltiple; obteniendo lo siguiente, ver Tabla 7.4.

T °C Aire	T °C Modelo RLM	T °C Modelo WRF	Promedio T °C Modelos
3,2	3,6	9,4	6,5
2,4	1,7	7,6	4,6
6,1	4,0	5,5	4,7
4,8	1,7	2,5	2,1
1,4	0,1	-2,1	-1,0
-3,6	-0,1	-0,9	-0,5
-1,0	1,3	2,0	1,7
0,2	3,2	7,5	5,4
4,2	5,7	10,1	7,9
-0,2	3,3	7,7	5,5
1,9	2,1	6,6	4,4

Tabla 7.4: Comparación entre temperaturas obtenidas mediante modelos de predicción, regresión lineal múltiple con temperaturas del aire registradas en la estación predichas a 24 horas, julio 2013**Fuente:** Escuela agrícola de San Felipe.

Los datos obtenidos al observar las temperaturas entregadas por la estación meteorológica (T °C del Aire) y las temperaturas del modelo de regresión lineal múltiple solo podrían ser representativas para algunos días. Con respecto a los datos de temperatura obtenidos tras la predicción realizada por el modelo WRF, se observó que la representatividad es aún menor.

Este capítulo tuvo como finalidad buscar y entregar un pronóstico a 24 y 48 horas utilizando las temperaturas resultantes de datos de variables meteorológicas entregados por la estación meteorológica y posteriormente agregar aquellos resultados de temperatura derivados del modelo WRF, promediando ambas temperaturas. La argumentación corregida, contempla que esta simulación realizada del modelo WRF fue del tipo experimental, la cual, posteriormente no ha sido corregida.

Estas diferencias de temperatura, podrían ser el resultado de que tanto el punto coordinado de la grilla del modelo WRF incluido el punto coordinado donde se situa la estación meteorológica estén a distintas alturas (geográficamente muy posible), por tanto, el *gradiente de temperatura* entre ambos será diferente. A esto, es importante adicionar que la topografía propia del lugar es bastante irregular y al momento de la simulación no se contemplaron variables que pudieron ser relevantes a la hora de querer ser más asertivos. No obstante, esta fue la primera aproximación de simulación del modelo WRF y la intención fue buscar otra metodología que pudiese aportar en el *pronóstico de temperatura a corto plazo*, por lo cual, un futuro ajuste y/o corrección post-simulación podría permitir un mejor dominio.

7.1.3. Conclusiones del Capítulo

Además de haber adquirido el conocimiento específico-técnico sobre *el cómo* se presenta y desarrolla una helada y en especial aquellas del tipo radiativa; que la severidad de su daño sobre un cultivo se debe principalmente a su resistencia a la helada, al de su estado fenológico, la topografía, a la intensidad y tiempo de la helada, como el tipo de método de control, se hizo relevante e interesante el adquirir una nueva herramienta de manejo y modelamiento de información, como son los modelos predictivos, ya que favorablemente se pueden evitar daños considerables a nivel productivo y económico. No obstante, se debe considerar y esto especialmente dada la caracterización de nuestra geografía y morfología, el desarrollar modelos específicos para cada zona en particular, aunque quedó la posibilidad a corto plazo de extrapolar modelos y metodologías que hoy están probadas y validadas para ser utilizadas en esta región y otras cercanas.

Por lo anterior, es preciso el fomentar el intercambio de metodologías, de datos, entre otros y, mejorar las políticas de prevención contra los daños producidos por las heladas. Al poseer esta información a tiempo, se podrá planificar más eficientemente el trabajo y activar las medidas de mitigación pertinentes a reducir los daños producidos por las heladas en caso de presentarse alguna.

Además, se hace necesario que dentro de las políticas de prevención, exista también la cooperación de profesionales calificados en la materia, ya sean agrónomos, entomólogos, entre otros, quienes dada su experiencia podrán aportar un mejor asesoramiento a la hora de ejecutar y desarrollar ciertas técnicas, considerando que la barrera del lenguaje técnico no sea un inconveniente, aspecto típico de nuestras profesiones.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y FUTUROS LINEAMIENTOS

Esta investigación tuvo la finalidad de abordar y entregar una metodología desde el punto de vista del uso de la teledetección, la utilización de sensores remotos, funciones estadísticas, modelamiento matemático y datos disponibles de estaciones meteorológicas, acerca del fenómeno meteorológico de las heladas y sus ocurrencias. El uso de información proveniente desde el satélite Aqua y su sensor MODIS, atendió principalmente a la homogeneidad, la generación, la multitemporalidad en la adquisición de sus datos, a la eficiente programación, documentación, herramientas y futura posibilidad de integrar nuevas variables o productos en la generación de nueva información a partir de estos.

Nuestro país, debido a su pronunciada e irregular topografía, extensa influencia marina, una diversa agricultura y tipo de suelo, hace que el disponer de información histórica, presente y futura acerca de la probabilidad de ocurrencia de temperaturas extremas y heladas, sea un dato importante, pues hoy en día, nuestra economía se sostiene favorablemente gracias a la exportación de productos agrícolas (*especialmente fruticultura*).

La época de crecimiento adecuada para un cultivo, puede ser definida por la época de ocurrencia de las heladas y por la diferente sensibilidad que cada cultivo presente a estas. Por lo anterior, es sumamente propicio el objetivo de establecer una fecha de siembra que disminuya el riesgo de ocurrencia de heladas en etapas definidas como críticas para cada cultivo (identificación de las fechas promedio de la primera y última helada, como también el conocer que tipo es el que se puede presentar).

Este dato, resulta aún más relevante al considerar que nuestra zona agrícola por excelencia está viviendo extensos periodos de sequía y que sumado a esto, se han presentado también las denominadas (*heladas negras en periodos del año y etapa de desarrollo del cultivo no habituales*), produciendo en muchos casos daños irreversibles a los cultivos, como fue lo acontecido en el mes de septiembre del año 2013, donde se produjo una de las heladas más extremas en las últimas décadas, dada su intensidad y extensión geográfica y que sin duda, el poder nutrir y entregar herramientas técnicas-prácticas a los agricultores puede ayudar a la hora de mitigar y reaccionar ante estos fenómenos meteorológicos de una forma más oportuna y concreta, pudiendo haber evitado por ejemplo que se perdiera más del 25% de toda la producción de frutas en la sexta región, lo cual, no solo afectó a la exportación, sino que también derivó en agudos problemas sociales, al existir una alta tasa de desempleo local.

En la actualidad, dado a que aún se adolece en muchos sectores del país de estaciones meteorológicas capaces de entregar información oportuna y de insuficiente instrumental técnico que entregue por ejemplo reportes de humedad relativa, velocidad del viento, entre otros; es que se hace válido el proceso de interpolación de datos entre estaciones meteorológicas y de predicción de datos mediante modelos matemáticos e imágenes satelitales, aunque se identificó que en repetidas ocasiones, esas interpolaciones fueron realizadas sobre bases de datos que presentaron significativos datos atípicos, los cuales otorgaron un grado de error a los resultados obtenidos (observaciones extraídas en la estación meteorológica de la comuna de La Cruz).

Tras los resultados obtenidos al realizar regresiones lineales simple y múltiples entre las temperaturas de superficie y del aire se demostró que es completamente factible y acertado caracterizar una determinada área y entregar con bastante certeza una coherencia temporal acerca de la ocurrencia de heladas por medio de este producto específico MYD11A1, considerando para el futuro cercano el establecer una metodología más *representativa*, la cual permita hacer predicciones futuras a 24 y 48 horas. Con respecto a esto, es importante comentar que se han llevado a cabo las primeras reuniones con la DMC para poder conocer e implementar el modelo WRF ya utilizado en CONAE, existiendo la posibilidad de incorporar esta experiencia de modelación, con la finalidad de disminuir las distancias de interpolación al simular desde territorio local. Además, de experimentar metodologías y resultados al utilizar nuevos productos MODIS a ocho días e imágenes LANDSAT, las que estarían permitiendo también validar esta metodología y posteriormente mejorar la resolución espacial derivado del tamaño del píxel de la imagen LANDSAT.

La realización de esta investigación, despertó interés no solo dentro de CIREN, sino que en diversas instituciones del MINAGRI, no solo por el tema particular de las heladas, sino también por los procesos y procedimientos internos que este desarrollo contiene. Manifestándose la intención de obtener nuevos productos e índices a través del uso de imágenes satelitales, así como también automatizar procesos dentro de la institución y descargas en volumen de ciertos productos desde los catálogos de MODIS, lo cual, gracias a script generados en python han permitido dar respuesta a esta solicitud interna.

Lineamientos futuros

Se hace indispensable el conformar equipos de trabajos multidiciplinarios, involucrar activamente a (*autoridades del MINAGRI, agricultores, profesionales del rubro*).

Existe bastante bibliografía y casos positivos en donde está demostrado que una continua sinergia entre todos los actores ha conllevado a mitigar exitosamente el fenómeno de las heladas. Hoy en día, podrían generarse una gran cantidad de mapas históricos de zonas con riesgo de ocurrencia de heladas a nivel nacional, ya que existe una extensa base de datos de imágenes satelitales disponibles libres (*MODIS o NOAA*), dado que estas imágenes satelitales tienen la particularidad de proporcionar datos espaciales diariamente en zonas donde los datos de estaciones meteorológicas son escasos.

Como seguimiento futuro a esta línea investigativa, se está a la espera de que CIREN pueda utilizar las bases de datos de las estaciones meteorológicas que están integrando distintos sectores del MINAGRI. Así como también, el utilizar aquellas metodologías que están utilizando la temperatura del aire a tan solo 10 centímetros del suelo, los modelos predictivos de temperaturas mínimas nocturnas en condiciones de heladas radiativas para sectores llanos, sobre suelo sin cubierta vegetal, entre otras.

Parte I

Anexo

Descarga de los datos

Una vez que el área y tipo de imagen quedó determinada, se procedió a la descarga de las imágenes. En una primera instancia, para la descarga de las imágenes MODIS se utilizó el siguiente enlace:

<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>

Para esto, el usuario debe crear una cuenta y posteriormente elegir los datos que desea descargar, ver Figura 8.1.

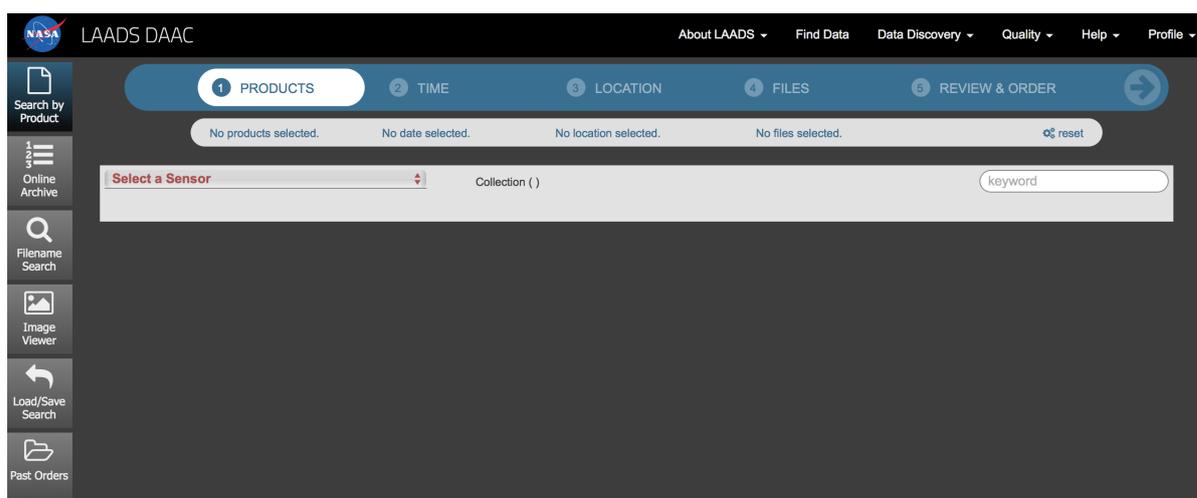


Figura 8.1: Sitio de descarga de imágenes MODIS

Fuente: LAADS Web.

Posterior a este procedimiento, se utilizó la descarga automática de imágenes MODIS mediante un script desarrollado en lenguaje Python 2.7.10, el cual empleó librerías de pyMODIS desde el sistema operativo GNU-Linux, distribución (*Ubuntu 14.04.04 LTS*).

```
./modis_download.py -t h12v12 -e 2016-10-31 -f 2011-05-31 -p MYD11A1.005  
h12v12
```

Código 8.1: Descarga de imágenes mediante librerías pyMODIS

Cabe destacar que la utilización de este código en Python, permitió la descarga automática de más de 2 000 imágenes de forma automática y, en caso de desconexión de internet, el script tuvo la capacidad de retomar la descarga desde la última imagen descargada correctamente.

Preámbulo del código

El objetivo de la presente sección fue dar a conocer una reseña del código utilizado, donde se explica de forma breve algunas de las librerías utilizadas.

Librerías y herramientas

Para trabajar con Python, es necesario el *importar* ciertas librerías específicas con el fin de facilitar los objetivos deseados, tal como se describió a continuación:

```
1 #Importar librerías
2 import gdal
3 from gdalconst import *
4 import osgeo
5 import osr
6 import osgeo.gdal as gdal
7 import osgeo.osr as osr
8 import numpy as np
9 import glob
10 import os
11 import shutil
```

Código 8.2: Librerías que se utilizaron en el script desarrollado en Python

La primera librería importada fue la denominada Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), que corresponde a una biblioteca distribuida por The Open Source Geospatial Foundation (OSGEO), la cual traduce los formatos y procesa los datos geospaciales raster y vectoriales; es liberada bajo una licencia Open Source y resulta un pilar crucial en la manipulación de imágenes satelitales desde una plataforma de programación (GDAL, 2016a).

Con el mismo nivel de importancia, se encuentra la herramienta Modis Reprojection Tool (MRT) (LPDAAC, 2014), la cual permite el procesamiento de las imágenes MODIS, utilizada en la reproyección de imágenes desde una *proyección sinusoidal* a una *proyección UTM WGS-84 huso 19s* (Dwyer y Schmidt, 2006).

La siguiente librería necesaria en la generación del código es OSGEO, esta fue desarrollada con el objetivo de apoyar el desarrollo colaborativo de software geoespacial de código abierto y promover su uso masivo. Sus principales funciones incluyen la importación y exportación de archivos, la ejecución de herramientas de reproyección, el análisis GIS, desarrollo de gráficos e impresiones (OSGeo, 2016).

La librería Numerical Python (NUMPY), corresponde a una extensión de Python cuyo propósito es agregar un mayor soporte para imágenes vectoriales y matriciales, construyendo una biblioteca de funciones matemáticas de alto nivel que son útiles a la hora de trabajar con vectores o matrices (Numpy, 2013).

La librería “*glob*” fue desarrollada sobre Python y su principal función es discriminar y ordenar entre archivos localizados en la misma carpeta con distintas extensiones. Otra librería necesaria en la operación miscelánea de directorios y archivos es la biblioteca “*os*”. Este módulo tiene relevancia en

el código al momento de crear carpetas, corroborar si éstas existen, ingresar a distintos directorios e incluso la ejecución efectiva de comandos de la librería GDAL.

En último lugar, se encuentra la librería “*shutil*”, la cual es utilizada en el código para *mover* archivos de una carpeta a otra y *eliminar* directorios que pierden importancia, lo que descarta de forma automática información redundante.

Detalles acerca de la versión de la librería GDAL

Antes de proceder con la explicación del código, es importante dar una breve referencia de la versión de la librería que más se utilizó en el código; la librería GDAL.

La versión de GDAL que fue utilizada en el código corresponde a la 2.0.0 lanzada en junio del 2015 y desarrollada por parte del OSGEO con el propósito de generar una plataforma de operaciones mixtas para el trabajo de datos geospaciales raster y vectoriales mediante el uso de una variedad de comandos disponibles. Esta versión trae consigo algunas mejoras respecto a la versión anterior como, por ejemplo, soporte para curvas geométricas, soporte a datos de tipo booleano, Int16 y Float32, modelos unificados para fuentes de datos raster y vectoriales, mejora del tiempo de soporte con precisión de milisegundos y nuevos *drivers* para trabajar con vectores (*ORG*) y rasters (GDAL), entre otras (OSGeo, 2015).

Reproyección de las imágenes

La implementación de la reproyección en el código consiste básicamente en cambiar el sistema de proyección original *proyección sinusoidal* a una local. De esta forma, el comando a utilizar es “*gdalwarp*” (GDAL, 2016b).

Código de reproyección

Gdalwarp es una herramienta de la librería GDAL que permite realizar reproyecciones y recortes con archivos vectoriales (*warp*). Así, el comando consta de diversos parámetros de entrada, que incluyen la proyección deseada, el tamaño del píxel, la proyección de entrada “original”, entre otros. Es importante destacar que en este mismo proceso es cuando se extrae la capa *layer* deseada para trabajar en determinado producto, ver Código 8.3.

```
1 #Generar Listado
2 list=glob.glob("*.hdf")
3 #Ordenar Listado
4 list.sort()
5
6 #~ #Por cada archivo del listado abre las bandas de temperatura y cobertura
   #~ de nubes y las reproyecta en UTM 19S
7 #~ for archivo in list:
8 #~ banda1="HDF4_EOS:EOS_GRID:"+archivo+":MODIS_Grid_Daily_1km_LST:
   #~ LST_Night_1km"
9 #~ banda2="HDF4_EOS:EOS_GRID:"+archivo+":MODIS_Grid_Daily_1km_LST:
   #~ Clear_night_cov"
10 #~ salida1=path_s+archivo[:-22]+":MODIS_Grid_Daily_1km_LST:LST_Night_1km.hdf
    #~ "
11 #~ salida2=path_s+archivo[:-22]+":MODIS_Grid_Daily_1km_LST:Clear_night_cov.
    #~ hdf"
12 #~ os.system("gdalwarp -tr 1000 1000 -s_srs '+proj=sinu +R=6371007.181 +
   #~ nadgrids=@null +wktext' -t_srs EPSG:32719 -r near "+banda1+" "+salida1)
13 #~ os.system("gdalwarp -tr 1000 1000 -s_srs '+proj=sinu +R=6371007.181 +
   #~ nadgrids=@null +wktext' -t_srs EPSG:32719 -r near "+banda2+" "+salida2)
```

Código 8.3: Ejemplo de reproyección para los productos MYD11A1

Dentro de los parámetros que se introdujeron al código, se destacan: el formato del archivo de salida (-o of HDF4Image), el tamaño del píxel (-tr 1000 1000), la proyección original (-s_srs '+proj=sinu +R=6371007.181 +nadgrids=@null +wktext'), la proyección deseada (-t_srs EPSG:32719) (*UTM, datum WGS 84 Huso 19s*), el método de reproyección (-r near), el archivo de entrada (' '+banda+'') y el de salida (' '+salida+'').

Factor de escala

Cada producto MODIS contiene múltiples capas, que a su vez cada capa tiene una característica específica. Cada uno de los valores de los píxeles presentes en estas capas se deben multiplicar por lo que se denomina un *factor de escala*, el cual tiene el objetivo de dejar los valores del píxel en “valores reales”.

La Tabla 8.1 resume los valores de los factores de escala de las capas de los productos que se trabajaron.

Producto	Capa	Factor de escala
MYD11A1	LST (diaria)	0,02
MYD11A1	NCSC (diaria)	0,0005

Tabla 8.1: Factor de escala de las capas Daily Nighttime Land Surface Temperature y Night Clear Sky Coverage

Fuente: NASA-USGS, 2014.

Dentro de algunas diferencias que existen entre los factores de escala se destacan que, para el caso de la temperatura, los valores que vienen por defecto (*luego de aplicar el factor de escala*) son en unidades de grados Kelvin, por lo que se procede a restarle la constante *-273,15* para dejar los valores de temperatura expresados en grados Celsius.

A su vez, éste valor se debe incorporar como un valor sin datos (`outBand.SetNoDataValue(-273.15)`), el cual debe ir en el código para la temperatura y, a su vez, ir después del comando `outBand.FlushCache()`.

```
banda2[i, j]=(banda[i, j]*0.02)-273.15
```

donde 0,02 es el factor de escala para la temperatura, ver Tabla 8.1 y *-273,15* es la transformación de grados Kelvin a grados Celsius, para que los píxeles queden expresados en grados Celsius.

Finalmente, se procedió a cambiar el formato de salida HDF-EOS por un formato que fuera capaz de ser leído por el software ENVI, el que fue utilizado para determinar las temperaturas de cada píxel dentro de cada una de las imágenes en la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

El Código 8.4, expresa la sentencia dentro del script para realizar el cambio de formato.

```
1 # crear la imagen de salida
2 # driver = gdal.GetDriverByName("ENVI")
3 # outDs = driver.Create(path_s2+carpeta+x[13:16], cols, rows, 1, GDT_Float32
   )
```

Código 8.4: Cambio de formato

BIBLIOGRAFÍA

- Abuín, J. R. (2007). Regresión lineal múltiple. *IdEyGdM-Ld Estadística, Editor*, 32.
- Aceituno, P. (1990). Anomalías climáticas en la región sudamericana durante los extremos de la oscilación austral. *Revista Geofísica*, 32, 65–78.
- Arango, C. & Ruiz, J. (2011). Implementación del modelo wrf para la sabana de bogotá.
- Aronoff, S. (2005). Satellite-based sensors operating in the visible and infrared wavelengths. *Remote sensing for GIS managers. ESRI Press, California*.
- Arroyo, M. T., Marquet, P., Marticorena, C., Simonetti, J., Cavieres, L., Squeo, F., Rozzi, R., & Massardo, F. (2008). El hotspot chileno, prioridad mundial para la conservación. *Biodiversidad de Chile, patrimonio y desafíos*, (pp. 90–93).
- Asner, G. P. (2001). Cloud cover in landsat observations of the brazilian amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3855–3862.
- Asner, G. P., Wessman, C. A., & Archer, S. (1998). Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, 8(4), 1003–1021.
- Avissar, R. & Mahrer, Y. (1988). Mapping frost-sensitive areas with a three-dimensional local-scale numerical model. part i. physical and numerical aspects. *Journal of Applied Meteorology*, 27(4), 400–413.
- Bagdonas, A., Georg, J., & Gerber, J. (1978). *Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection*. WMO.
- Baldini, E. (1992). Arboricultura general. *Mundi-Prensa, Madrid*, 2.
- Bande, M. F., San Miguel, P. G., Díaz, J. G., & López, B. P. (2008). Practicas de estadística en r: Ingeniería técnica en informática de sistemas. *Departamento de estadística e investigación operativa de la Universidad de Santiago de Compostela. Galicia-España*.
- Barnes, W. L., Xiong, X., & Salomonson, V. V. (2002). Status of terra modis and aqua modis. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. 2002 IEEE International*, volume 2 (pp. 970–972).: IEEE.

BIBLIOGRAFÍA

- Basist, A., Goodison, N. B., Walker, A., Carroll, T., Armstrong, N. R., Josberger, E., Kelly, R., & District, W. (2000). Algorithm theoretical basis document (atbd) for the.
- BCN (2016). *Región de Valparaíso*. Technical report, Biblioteca del Congreso Nacional.
- Blanc, M., Geslin, H., Holzberg, I., & Mason, B. (1963). *Protection against frost damage*. Technical report, W.M.O - Switzerland.
- Borengasser, M., Hungate, W. S., & Watkins, R. (2007). *Hyperspectral remote sensing: principles and applications*. CRC press.
- Broberg, S. E., Aumann, H. H., Gregorich, D. T., & Xiong, X. (2006). Evaluation of airs, modis, and hirs 11 micron brightness temperature difference changes from 2002 through 2006. In *SPIE Optics+ Photonics* (pp. 62960J–62960J).: International Society for Optics and Photonics.
- Bustos, O. H. (2012). Introducción a los procesos markovianos en el análisis y procesamiento de imágenes. *Universidad Nacional de Córdoba*.
- Castro, E., Soto, F., & Guarda, A. (1984). Conservación de alimentos mediante frío. *Biblioteca Digital de la Universidad de Chile*, II.
- Castro, I. et al. (2009). *Metodología de validación de productos MODIS para la estimación de temperatura de la superficie en zonas heterogéneas y homogéneas de Colombia*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Tercera Edición.
- Cihlar, J., Chen, J., & Li, Z. (1997). On the validation of satellite-derived products for land applications. *Canadian journal of remote sensing*, 23(4), 381–389.
- Colle, B. A., Westrick, K. J., & Mass, C. F. (1999). Evaluation of mm5 and eta-10 precipitation forecasts over the pacific northwest during the cool season. *Weather and Forecasting*, 14(2), 137–154.
- CONAF (1997). Plan de manejo parque nacional la campana.
- Cárdenas Gasmuri, M. I., Ovalle Reyes, J., Díaz Estades, M. A., Gutiérrez Araya, E., Cubillos, A., et al. (1989). Atlas agroclimático de Chile: Iv-ix regiones.
- Crimp, S., Pook, M., Gobbet, D., Khimashia, N., Laing, A., & Nidumolu, U. (2013). Understanding frost risk in a variable and changing climate. *www.orm.com.au*.
- Crisosto, C. (1989). Métodos para controlar o disminuir las incidencias de heladas. *Revista Frutícola*, 10, 44–51.
- Danforth, C. M. & Kalnay, E. (2008). Using singular value decomposition to parameterize state-dependent model errors. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(4), 1467–1478.
- Demcsak, M. (1997). Hdf-eos library users guide for the ecs project volume 2: Function reference guide. *Hughes Applied Information Systems*. doi.
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos 2a Ed*. Universidad de Antioquia.

BIBLIOGRAFÍA

- Doraiswamy, P., Pasteris, P., Jones, K., Motha, R., & Nejedlik, P. (2000). Techniques for methods of collection, database management and distribution of agrometeorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(1), 83–97.
- Dwyer, M. J. & Schmidt, G. (2006). The modis reprojection tool. In *Earth science satellite remote sensing* (pp. 162–177). Springer.
- Ellison, E. (1928). A critique on the construction and use of minimum-temperature formulas. *Monthly Weather Review*, 56(12), 485–495.
- Engel-Cox, J. A., Holloman, C. H., Coutant, B. W., & Hoff, R. M. (2004). Qualitative and quantitative evaluation of modis satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 38(16), 2495–2509.
- Feng, S., Hu, Q., & Qian, W. (2004). Quality control of daily meteorological data in china, 1951–2000: a new dataset. *International Journal of Climatology*, 24(7), 853–870.
- Fernandez, M. E., Barnatán, I. E., Spescha, L., Hurtado, R., & Murphy, G. (2005). Caracterización de las heladas en la región pampeana y su variabilidad en los últimos 10 años. *Facultad de Agronomía*, 25(3), 247–257.
- Fernández, R., Lakkis, G., Allende, D., Santos, R., Cremades, P., & Puliafito, E. (2011). Modelación de un evento meteorológico de mesoescala utilizando el modelo wrf. *Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina*, (pp. 289–298).
- Franklin, S. & Wulder, M. (2002). Remote sensing methods in medium spatial resolution satellite data land cover classification of large areas. *Progress in Physical Geography*, 26(2), 173–205.
- Gala, F. B. (1993). Las heladas y su incidencia económica en la agricultura de murcia. *papeles de Geografía*, (19), 37–51.
- Gardiazabal, F. (1998). Floracion en paltos. sociedad gardiazabal y magdahl ltda. *Seminario Internacional de paltos. Vina del Mar*, (pp. 17–37).
- Gázquez, A., Perpinyà, M., & Peña, J. (2003). The xac-agroclimatology network of catalonia (la xarxa agrometeorològica de catalunya). In *3rd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations* (pp. 19–21).
- GDAL (2016a). GDAL Main Page. *Geospatial Data Abstraction Library*. Obtenida el 16 de febrero de 2016, desde: <http://www.gdal.org/>.
- GDAL (2016b). Gdalwarp. *Geospatial Data Abstraction Library*. Obtenido el 16 de febrero de 2016, desde: <http://www.gdal.org/gdalwarp.html>.
- Gil, F. (1992). Tratado de arboricultura frutal: Técnicas de plantación de especies frutales. *Mundi Prensa, Madrid*.
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., Bleeker, W., & Lourens, L. J. (2004). A new geologic time scale, with special reference to precambrian and neogene. *Episodes*, 27(2), 83–100.

- Graybeal, D. Y., DeGaetano, A. T., & Eggleston, K. L. (2004). Improved quality assurance for historical hourly temperature and humidity: development and application to environmental analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 43(11), 1722–1735.
- Grüter, E., Häberli, C., Küng, U., Mumenthaler, P., Mettler, J., Bassi, M., Konzelmann, T., & Dösseger, R. (2001). The next generation of quality control tools for meteorological data at meteoswiss dach-mt 2001.
- Guerrero Higuera, Á. M., García Ortega, E., Matellán Olivera, V., Sánchez Gómez, J. L., *et al.* (2012). Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo wrf mediante ncl.
- Gutiérrez, C. & Nieto, L. (2006). Teledetección: Nociones y aplicaciones.
- Guzman, G. & Alonso, C. (2001). Probabilidad de ocurrencia de temperaturas mínimas que pueden causar daños de incidencia agrícola en ñuble central.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002). Modis snow-cover products. *Remote sensing of Environment*, 83(1), 181–194.
- Hinojosa, L. F. & Villagrán, C. (1997). Historia de los bosques del sur de sudamérica, i: antecedentes paleobotánicos, geológicos y climáticos del terciario del cono sur de américa. *Revista Chilena de Historia Natural*, 70(2), 225–240.
- Hogg, W. (1971). Spring frost. *Agriculture*, 78(1), 28.
- Holmgren, M., Scheffer, M., Ezcurra, E., Gutiérrez, J. R., & Mohren, G. M. (2001). El niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(2), 89–94.
- Hubbard, K. G. & Siva Kumar, M. (2001). Automated weather stations for applications in agriculture and water resources management.
- Inzunza, J. (2000). Meteorología descriptiva. *Climas de Chile. Universidad de Concepción*. <<http://www.udec.cl/~jinzunza/meteo/cap15.pdf>>. s/f.
- Iriondo, M. (2007). *Introducción a la Geología*. Editorial Brujas.
- Jagtap, S., Jones, J., Hildebrand, P., Letson, D., O'Brien, J., Podestá, G., Zierden, D., & Zazueta, F. (2002). Responding to stakeholder's demands for climate information: from research to applications in florida. *Agricultural systems*, 74(3), 415–430.
- Jiménez, R. M. R., Capa, Á. B., Lozano, A. P., & Benadero, F. R. (2004). *Meteorología y climatología*. FECYT, Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.
- Jones, P., Jedlovec, G., Suggs, R., & Haines, S. (2004). Using modis lst to estimate minimum air temperatures at night. In *13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography* (pp. 13–18): American Meteorological Society Norfolk.
- Justice, C., Belward, A., Morisette, J., Lewis, P., Privette, J., & Baret, F. (2000). Developments in the 'validation' of satellite sensor products for the study of the land surface. *International Journal of Remote Sensing*, 21(17), 3383–3390.

- Justice, C., Townshend, J., Vermote, E., Masuoka, E., Wolfe, R., Saleous, N., Roy, D., & Morisette, J. (2002). An overview of modis land data processing and product status. *Remote sensing of Environment*, 83(1), 3–15.
- Kaufman, Y. J., Herring, D. D., Ranson, K. J., & Collatz, G. J. (1998). Earth observing system and mission to earth. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1045–1055.
- Kotikot, S. M. & Onywere, S. M. (2015). Application of gis and remote sensing techniques in frost risk mapping for mitigating agricultural losses in the aberdare ecosystem, kenya. *Geocarto International*, 30(1), 104–121.
- Lighezzolo, A., Lanfri, M., García, F., Clemoveki, K., Bridera, D., & Scavuzzo, M. (2016). Sistemas de alerta temprana a emergencias ambientales basados en modelos numéricos de predicción meteorológica. In *Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), 2016 IEEE* (pp. 1–6): IEEE.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- LPDAAC (2014). MODIS Reprojection Tool. *Land Processes Distributed Active Archive Center; NASA & USGS*. Obtenida el 1 de marzo de 2016, desde: https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool.
- Martinez, L., Ibacache, A., & Rojas, L. (2007). Las heladas en la agricultura. *Boletín INIA*, 165, 68.
- Martínez, J. & Díaz, A. (2005). Percepción remota "fundamentos de teledetección espacial". *Comisión Nacional del Agua*.
- Maunder, W. J. (1970). value of the weather.
- Meek, D. & Hatfield, J. (1994). Data quality checking for single station meteorological databases. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69(1-2), 85–109.
- Meliá, J. (1991). *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables. Agricultura: Curso de postgrado: Valencia, 25 de febrero-9 de marzo 1991*. Universitat de València.
- Meza, L., Soza, S., & Valle, P. (2011). *Propuesta de un Modelo de Gestión para el Riesgo Agroclimático*. Technical report, MINAGRI - FAO.
- Miller, A. (1976). The climate of chile. *World survey of climatology*, 12, 113–145.
- Miller, P. A. & Barth, M. F. (2003). Ingest, integration, quality control, and distribution of observations from state transportation departments using madis. In *19th International Conference on Interactive Information and Processing Systems*.
- Minnis, P., Sun-Mack, S., Chen, Y., Khaiyer, M. M., Yi, Y., Ayers, J. K., Brown, R. R., Dong, X., Gibson, S. C., Heck, P. W., *et al.* (2011). Ceres edition-2 cloud property retrievals using trmm virs and terra and aqua modis data—part ii: Examples of average results and comparisons with other data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11), 4401–4430.
- Molnar, G. I. & Susskind, J. (2005). Validation of airs/amsu cloud retrievals using modis cloud analyses. In *Defense and Security* (pp. 618–629): International Society for Optics and Photonics.

BIBLIOGRAFÍA

- Morissette, J. T., Privette, J. L., & Justice, C. O. (2002). A framework for the validation of modis land products. *Remote sensing of environment*, 83(1), 77–96.
- NASA-USGS (2014). Land Surface Temperature and Emissivity Daily L3 Global 1 km Grid SIN. *MOD11A1 – Temperature*. Obtenida el 1 de marzo de 2016, desde: https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod11a1.
- Nightingale, J., Nickeson, J., Justice, C., Baret, F., Garrigues, S., Wolfe, R., & Masuoka, E. (2008). Global validation of eos land products, lessons learned and future challenges: A modis case study. In Available from. *Proceedings of 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment: Sustaining the Millennium Development Goals, Stresa, Italy*, http://landval.gsfc.nasa.gov/pdf/ISRSE_Nightingale.pdf (last access: November 2015) (pp.4).
- Norero, A. (1991). Impacto de las heladas en la agricultura. *panorama económico de la agricultura*. (pp. 27–35).
- Numpy (2013). Main Page. Obtenida el 18 de febrero de 2016, desde: <http://www.numpy.org/>.
- ODEPA (2013). Efecto heladas de septiembre en frutales y hortalizas entre la region de coquimbo y la del maule. (pp. 10–12).
- Olabarrieta, M., Warner, J. C., Armstrong, B., Zambon, J. B., & He, R. (2012). Ocean–atmosphere dynamics during hurricane ida and nor’ida: an application of the coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (coawst) modeling system. *Ocean Modelling*, 43, 112–137.
- Olaya, V. (2011). Sistema de información geográfica.
- OMM (2010). *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción, (Anexo IV al Reglamento Técnico de la OMM)*, actualización 2012 edición.
- ONEMI, U. R. O. N. (2009). Consolidado heladas y nevadas - impacto en el sector agricultura.
- OSGeo (2015). GDAL/OGR 2.0.0 released. Obtenida el 18 de febrero de 2016, desde: <http://www.osgeo.org/node/1591>.
- OSGeo (2016). The Open Source Geospatial Foundation. *OSGeo – Your Open Source Compass*. Obtenida el 18 de febrero de 2016, desde: <http://www.osgeo.org/>.
- Palma, G. A. B. *et al.* (1993). *Transferencia de embriones: y biotecnología de la reproducción en la especie bovina*. Hemisferio Sur,.
- Palomo, M. (2012). *Modelización del cálculo de indicadores ambientales, a partir de sensores ópticos de alta resolución temporal a bordo de satélites*. PhD thesis, Topografía.
- Pannunzio, A. (2009). Sistemas de riego como herramienta para combatir los efectos de las heladas en cultivo de arándano. *Informe frutihortícola.(287): 20-22, 2009*.
- Parkinson, C. L., Greenstone, R., & Closs, J. (2000). Eos data products handbook. volume 2.
- Parodi, J. A., Rodríguez González, J. M., & Rodríguez Camino, E. (2016). La nueva generación de modelos climáticos. el proyecto europeo ec-earth.

- Perry, K. (1994). Freeze/frost protection for horticultural crops. North Carolina State University Cooperative Extension, Horticulture Information Leaflet.
- Petitcolin, F. & Vermote, E. (2002). Land surface reflectance, emissivity and temperature from modis middle and thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), 112–134.
- Piuzzi, B. (2007). *Aplicaciones de la Meteorología en la actividad silvoagropecuaria*. Dirección Meteorológica de Chile.
- Planck, M. (1988). The theory of heat radiation. the history of modern physics 1800–1950, vol. 11.
- Platnick, S., King, M. D., Ackerman, S. A., Menzel, W. P., Baum, B. A., Riédi, J. C., & Frey, R. A. (2003). The modis cloud products: Algorithms and examples from terra. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 459–473.
- Pouteau, R., Rambal, S., Ratte, J.-P., Gogé, F., Joffre, R., & Winkel, T. (2011). Downscaling modis-derived maps using gis and boosted regression trees: the case of frost occurrence over the arid andean highlands of bolivia. *Remote Sensing of Environment*, 115(1), 117–129.
- Powell, A. & Himelrick, D. (2000). Principles of freeze protection for fruit crops. *Alabama Cooperative Extension System*.
- Pérez, C. (2006). *Teledetección, Nociones y Aplicaciones*.
- Ramírez, M., Fuentes, O., & García, F. (2001). *Heladas*. Technical report.
- Rasmussen, M. O., Pinheiro, A. C., Proud, S. R., & Sandholt, I. (2010). Modeling angular dependences in land surface temperatures from the sevir instrument onboard the geostationary meteosat second generation satellites. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(8), 3123–3133.
- Rautiainen, K., Pulliainen, J., Lemmetyinen, J., Ménard, C., Bottcher, K., Kontu, A., & Ikonen, J. (2012). Global soil frost detection using l - band remote sensing data. *Finnish Meteorological Institute Finnish Environment Institute, ESA - ESRIN*.
- Richards, K. & Baumgarten, Y. (2003). Towards topoclimate maps of frost and frost risk for southland, new zealand.
- Rigby, J. & Porporato, A. (2008). Spring frost risk in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, 35(12).
- Rigo, G., Parlow, E., & Oesch, D. (2006). Validation of satellite observed thermal emission with in-situ measurements over an urban surface. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 201–210.
- Rodríguez, J. & Marín, R. (1999). *Fisicoquímica de Aguas*. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Rodríguez, M. Á. (2008). Predicción meteorológica y caos en espacio-tiempo. *Revista española de física*, 22(1), 66–69.
- Rodríguez, O., Hernadez, J., & Navarro, L. (2011). "frost control" semillero de investigación.
- Rudorff, B. (2007). *Sensor Modis y sus Aplicaciones Ambientales en Brasil*. Editorial Paraenense.

- Running, S., Justice, C., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, J., Strahler, Y., & others. (1994). Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for eos/modis. *International journal of remote sensing*, 15(17).
- Rutllant, J. & Fuenzalida, H. (1991). Synoptic aspects of the central chile rainfall variability associated with the southern oscillation. *Int. J. Climatol*, 11(1), 63–76.
- Salinero, C., Salinero, E. C., Viola, A. B. B. V., Maclean, A. S. A. S., Goodman, R. E., Krynine, D. P., & William, R. (2006). *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel.
- Santibañez, F. (1987). Agroclimatología de la producción frutícola. *Universidad de Chile*.
- Santos-Muñoz, D., Martín, M., & Luna, M. (2005). Supercomputación y modelos meteorológicos.
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., & Nickless, D. (2004). Terra and aqua modis products available from nasa ges daac. *Advances in Space Research*, 34(4), 710–714.
- Schmugge, T., Hook, S., & Coll, C. (1998). Recovering surface temperature and emissivity from thermal infrared multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 65(2), 121–131.
- Shafer, M. A., Fiebrich, C. A., Arndt, D. S., Fredrickson, S. E., & Hughes, T. W. (2000). Quality assurance procedures in the oklahoma mesonet. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(4), 474–494.
- Simões, D. d. S. & Fontana, D. C. (2015). Use of lst images from modis/aqua sensor as an indication of frost occurrence in rs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 920–925.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2*. Technical report, DTIC Document.
- Smith, J. A., Chauhan, N. S., Schmugge, T. J., & Ballard Jr, J. R. (1997). Remote sensing of land surface temperature: the directional viewing effect. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(4), 972–974.
- Snyder, R. & Abreau, J. (2010). El daño producido por las heladas: Fisiología y temperaturas críticas. *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*, 1, 241.
- Tassara, M. (2007). Las heladas primaverales: Protección en frutales de clima templado-frío. *Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- Tinetti, F. G., Cajaraville, P. G., Labraga, J. C., López, M. A., & Rodrigues Puchta, D. (2008). Análisis y modificación de código heredado para cómputo de alto rendimiento con modelos numéricos del clima. In *X Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.
- Toledo, S. (2002). Heladas en fruticultura. *Pontificie Universidad Católica de Valparaíso*.
- Tristan, P., Wainschenker, R., & Doorn, J. (2005). Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal. In *VII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.

- Urbina, V. (2007). Daños por heladas en frutales. sintomatología y evaluación. *Generalitat de Catalunya - Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural*.
- Velarde, M. (2014). Diseño y análisis de datos. *Universidad de Sevilla*.
- Villaseca, S., Novoa, R., & Carrasco, O. (1992). Las heladas y su importancia en la agricultura. *Investigación y Progreso Agropecuario. La Platina*, (pp. 34–38).
- Wan, Z. (2007). Collection-5 modis land surface temperature products users' guide. *ICESSE, University of California, Santa Barbara*.
- Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the modis land-surface temperature/emissivity products. *Remote sensing of Environment*, 112(1), 59–74.
- Wan, Z. & Dozier, J. (1996). A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 34(4), 892–905.
- Wan, Z. & Li, Z.-L. (1997). A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from eos/modis data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 980–996.
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z.-L. (2004). Quality assessment and validation of the modis global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 261–274.
- Wang, H., Wang, J., Wang, Q., Miao, N., Huang, W., Feng, H., & Dong, Y. (2012). Hyperspectral characteristics of winter wheat under freezing injury stress and lwc inversion model. *IEEE*, (pp. 1–6).
- Weiss, A. & Robb, J. (1986). Results and interpretations from a survey on agriculturally related weather information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(1), 10–15.
- Yuri, S. (1991). Las heladas en fruticultura. *Revista frutícola*, 13, 69–74.